

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Obor N3106

Textilní materiálové inženýrství

Katedra textilních materiálů

Vlastnosti stranově vyzařujících optických vláken

Properties side-emitting optical fibres

TMI - 596

Bc. Pavla Balčiráková

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková

Konzultant práce: Ing. Jana Špánková

Ostatní konzultanti: Ing. Barbora Meryová

Rozsah práce a příloh

Počet stran textu: 98

Počet obrázků: 80

Počet tabulek: 18

Počet příloh: 3

P r o h l á š e n í

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 14. 01. 2013

.....

Podpis

Poděkování

Chtěla bych poděkovat doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové své vedoucí diplomové práce za odborné vedení, pomoc a cenné rady v celém průběhu zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Janě Špánkové za pomoc s programem Matlab, bez kterého bych se neobešla. Také děkuji Ing. Barboře Meryové za pomoc v laboratoři a ochotu mi vždy poradit či pomoci.

Mé poděkování patří také rodině a mým nejbližším, kteří mě po celou dobu podporovali a dodávali mi tak potřebnou energii.

Bc. Pavla Balčiráková

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi optických stranově vyzařujících vláken. Zkoumány jsou vlastnosti mechanické, optické a tepelné s ohledem na zpracovatelnost a použití v textilu. V rešeršní části jsou popsány základní principy vyzařování, druhy optických vláken, jejich výroba a vlastnosti. Experimentální část zkoumá jednotlivé vlastnosti a jejich negativní či pozitivní vliv na zpracovatelnost. Závěrem je zhodnoceno použití stranově vyzařujících optických vláken v textilu.

Klíčová slova

Optika, optické vlákno, stranově vyzařující, preforma, vlastnosti, textil, bezpečnost

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the properties of side – emitting optical fibres. Thesis examines the properties of mechanical, optical and thermal with respect to processability and use in textiles. The search section describes the basic principles of radiation, types of optical fibers, their production and properties. Experimental section examines individual characteristics and their negative or positive impact on processing. Finally, it is evaluated using side- emitting optical fiber in textiles.

Keywords

Optics, optical fiber, side-emitting, preforms, properties, textiles, security

Seznam symbolů a zkratek

c	$[\text{ms}^{-1}]$	rychlost světla ve vákuu
v_λ	$[\text{ms}^{-1}]$	rychlost světla v látce o vlnové délce λ
λ	$[\text{m}]$	vlnová délka
n	$[-]$	index lomu
α_c	$[\text{°}]$	kritický úhel
SI		optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu
GI		optická vlákna gradientní
SM		optická vlákna jednovidová
P_z	$[\text{W}]$	světelný výkon ve vzdálenosti z
P_0	$[\text{W}]$	světelný výkon na začátku vlákna
α	$[-]$	součinitel útlumu
NA	$[-]$	numerická apertura
P_1	$[\text{W}]$	vstupní světelný výkon
P_2	$[\text{W}]$	výstupní světelný výkon
I	$[\text{Wm}^{-2}]$	světelná intenzita
T_g	$[\text{°C}]$	teplota zesklennění
T	$[\text{°C}]$	absolutní teplota
T_m	$[\text{°C}]$	teplota tání
T_f	$[\text{°C}]$	teplota viskozního toku
T_z	$[\text{°C}]$	teplota degradace
C_p	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$	měrné teplo
λ	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost

G	[J]	volná entalpie
H	[J]	entalpie
S	[-]	entropie
P	[Pa]	tlak
PMMA		polymethylmethakrylát
PC		polykarbonát
M_m	$[\text{kg mol}^{-1}]$	molekulární hmotnost
σ_p	[Pa]	mez pevnosti
σ_n	[Pa]	normované napětí
F	[N]	síla
S	$[\text{m}^2]$	plocha
ε	[%]	tažnost
l	[m]	délka vzorku po přerušení
l_0	[m]	původní délka vzorku
E_p	[GPa]	počáteční tangentový modul
F_l		Flexibilita
FC	[cykly]	počet ohybů do přerušení
A	[cykly]	nejnižší počet cyklů
B	[cykly]	parametr měřítka
C	[-]	parametr tvaru
$\Gamma(x)$		gamma funkce
m_r		weibullový momenty

Obsah

1	Úvod	12
2	Optická vlákna.....	13
2.1	Princip funkce optického vlákna	14
2.1.1	Optika.....	14
2.1.2	Zákon odrazu	14
2.1.3	Odraz od nedokonale odrazivého povrchu	16
2.1.4	Index lomu	16
2.1.5	Zákon lomu světla – Snellův zákon	17
2.1.6	Princip reverzibility paprsků.....	18
2.2	Výroba optických vláken	18
2.2.1	Materiály pro optická vlákna	19
2.2.2	Příprava preformy	20
2.2.3	Tažení vláken.....	26
2.3	Druhy optických vláken	28
2.3.1	Mnohovidová optická vlákna.....	29
2.3.2	Jednovidová optická vlákna.....	32
2.4	Důležité parametry optických vláken.....	33
2.4.1	Šířka pásma.....	33
2.4.2	Numerická apertura.....	33
2.5	Vlivy působící na ztrátu svítivosti.....	34
2.5.1	Útlum světelného signálu.....	34
2.5.2	Ztráty z důvodu znečištěného materiálu vlákna.....	35
2.5.3	Vidová disperze	35
2.5.4	Ohyb vlákna	35
2.5.5	Obsah OH skupin	37
2.5.6	Lineární rozptyl.....	37

2.5.7	Světelná intenzita	38
2.6	Použitý materiál	38
2.6.1	Plasty.....	38
2.6.2	Nadmolekulární struktura	39
2.6.3	Molekulární struktura.....	42
2.6.4	Polymethylmethakrylát (PMMA)	43
2.6.5	Polykarbonát (PC).....	44
2.7	Aplikace optických vláken	45
3	Testování optických vláken	50
3.1	Geometrie	50
3.1.1	Měření geometrických vlastností	50
3.1.2	Měření termických vlastností.....	51
3.2	Optické vlastnosti.....	52
3.2.1	Měření světelné intenzity v napřímeném stavu	52
3.3	Mechanické vlastnosti	54
3.3.1	Měření mechanických vlastností.....	57
3.3.2	Měření akustického modulu.....	57
3.3.3	Měření ohybové únavy materiálu	61
3.3.4	Měření tuhosti v ohybu	62
3.4	Tepelné vlastnosti.....	64
3.4.1	Měření tepelné sráživosti a srážecí síly	65
4	Experimentální část	68
4.1	Mechanické vlastnosti	68
4.2	Optické vlastnosti.....	75
4.3	Tepelné vlastnosti.....	78
4.4	Lomy	83
5	Závěr.....	86

6	Použitá literatura.....	95
7	Seznam obrázků.....	97
8	Seznam Tabulek	100

1 Úvod

Cílem této práce je testování stranově vyzařujících vláken, která se používají na aktivně bezpečnostní textilie a výrobky. V současné době se v oblasti bezpečnosti používají především pasivní reflexní textilie.

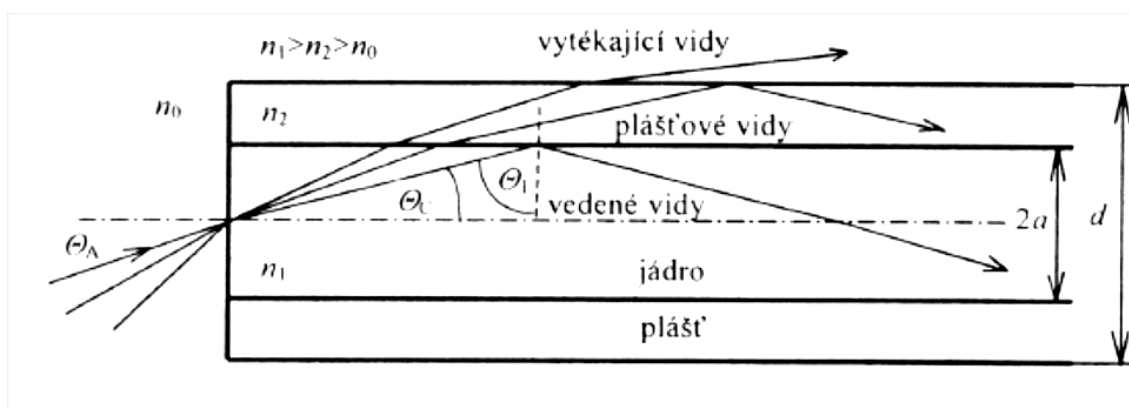
Na začátku je vypracována lineární rešerše z oblasti optických vláken. Jsou zde popsány principy vyzařování a s tím spojené optické vlastnosti vláken. Dále je popsána výroba optických vláken. Jednak výroba klasických skleněných optických vláken, tak i výroba moderních polymerních optických vláken. Také jsou zde uvedeny druhy vláken a rozdíly mezi nimi. Především rozdíly v konstrukci (jednovidová, mnohovidová vlákna), a v principu vyzařování (koncově svítící, stranově vyzařující vlákna).

V ústřední části je navrženo testování vybraných mechanických, optických a tepelných vlastností stranově vyzařujících optických vláken. Vlastnosti jsou vybrány s ohledem na funkci v aktivních bezpečnostních textiliích. Ke každé vybrané vlastnosti bude navržen i vhodný přístroj k testování.

Experiment bude spočívat v tom, že stranově vyzařující optická vlákna budou postupně testována na vybrané vlastnosti. Díky výsledkům z těchto měření, bude možno navrhnout vhodnou aplikaci stranově vyzařujících vláken do aktivně bezpečnostní textilie nebo výrobku. Správnou aplikací budou vlákna splňovat svoji funkci, jako světelný aktivní bezpečnostní prvek.

2 Optická vlákna

Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod zhotovený z vlnového materiálu s nízkými ztrátami, například z křemenného skla či plastu. Je tvořen vnitřním jádrem, které slouží k vedení přenášeného záření (signálu). Jádro je uloženo ve vnějším obalu – plášti, majícím nepatrně nižší hodnotu indexu lomu. To znamená, že signál přechází z hustšího prostředí do řidšího, jak jde vidět na obrázku Obr. 1. ^[2]



Obr. 1 Model optického vlákna[2]

Paprsky, které dopadají na rozhraní jádra - pláště pod úhlem Θ_1 větším, než je mezní úhel, se totálně odrazí a jsou jádrem vedeny, aniž by na rozhraní docházelo k lomu. Tento jev je důležitý především u koncově svítících optických vláken. U těchto vláken je žádoucí, aby se paprsek co nejrychleji dostal na druhý konec vlákna. Ovšem paprsky svírající s osou vlákna větší úhly než-li Θ_A , se na rozhraní částečně lámou, část přenášeného výkonu se při každém odrazu ztrácí do obalu. Tyto paprsky nejsou jádrem vedeny. Paprsek procházející optickým vláknem se nazývá vid. ^[2]

Rozdíl mezi koncově svítícími optickými vlákny a stranově vyzařujícími je ten, že u stranově vyzařujících je rozdíl mezi indexy lomu na rozhraní jádro-plášť kolem 1 %, čím víc se tento rozdíl zvyšuje, tím víc zůstávají vedené paprsky uvnitř vlákna. ^[12]

Pro další zajištění stranového vyzařování je možné použít i tyto varianty: ^[19]

- Při výrobě vlákna se do polymeru umísťují vhodné „mikro“ korálky
- Povrch vlákna je chemicky nebo mechanicky narušen (vznik otvorů)

- Jsou použity speciální polymery pro výrobu tzv. „zrcadlových“ vláken (2D fotonové krystaly obsahující alternující vrstvy materiálu s vysokým rozdílem indexů lomu)

2.1 Princip funkce optického vlákna

Vedení paprsků (vidů) v optickém vlákně, jak u koncově, tak u stranově svítících se řídí základními principy optiky.

2.1.1 Optika

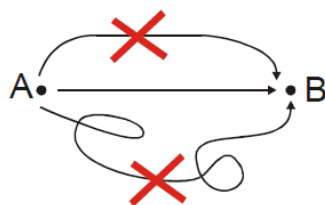
Optika je věda, která zkoumá původ a zákonitosti světelných jevů, vzájemné působení světla a látky a zabývá se i detekcí světla. Světlo je viditelná oblast elektromagnetického záření v přibližném rozsahu asi 380 – 780nm, kterou lidský mozek zpracovává viděním. Optika se zabývá i oblastí IR (infračervené) a UV (ultrafialové) a člení se:

- Geometrická optika (paprsková)
 - Světlo je vlna s velmi krátkou vlnovou délkou
- Fyzikální optika (vlnová)
 - Světlo je příčné vlnění
- Kvantová optika (fotonová)
 - Světlo je příčné vlnění s diskrétní energií

Pro vysvětlení principů vyzařování optických vláken se bude tato práce zabývat pouze geometrickou optikou. Předpokládá se, že světlo je paprsek. Světlo se šíří ze zdroje podél přímek (paprsky). Podle Fermotova principu (1679) se světlo šíří v opticky stejnorodém prostředí přímočaře, tj. po nejkratší dráze mezi dvěma body. V opticky nehomogenním prostředí se šíří od bodu k bodu s různým indexem lomu. ^[1]

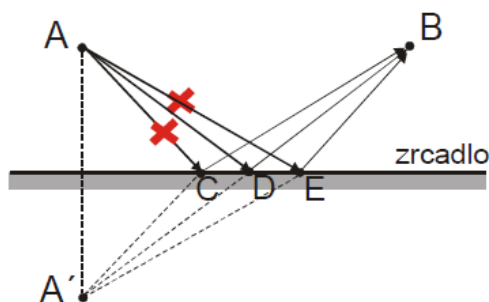
2.1.2 Zákon odrazu

Podle Fermatova principu se světlo šíří po nejkratší dráze, jak znázorňuje obrázek Obr. 2.



Obr. 2 Šíření světla[1]

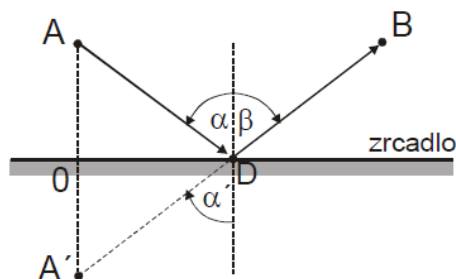
Pro ověření tohoto předpokladu, jsou pozorovány 3 možné dráhy paprsku odrážející se od zrcadlové plochy, které jsou na obrázku Obr. 3.



Obr. 3 Možné dráhy odrazu[1]

Jsou-li porovnávány vzniklé trojúhelníky, musí platit: $AD=A'D$; $AC=A'C$; $AE=A'E$, navíc je-li $A'DB$ přímka mezi A' a B , potom musí také platit: $A'DB < A'CB$ a $A'DB < A'EB$ a z toho vyplývá, že $ADB < ACB$ a $ADB < AEB$. Jinak řečeno, nejkratší cesta mezi body A a B při odrazu od zrcadlové plochy, je cesta před bod D .

Na obrázku Obr. 4 je znázorněn popis úhlů. Úhly jsou vyznačovány vždy od normály k paprsku. Úhle dopadu, je značen jako α , úhel odrazu je značen jako β .



Obr. 4 Značení úhlů[1]

Jsou-li trojúhelníky AOD a $A'OD$ shodné, potom platí že $\alpha = \alpha'$, jestliže se normála kříží s přímkou $A'B$, potom platí, že $\alpha' = \beta$. Z těchto poznatků vyplývá zákon odrazu.

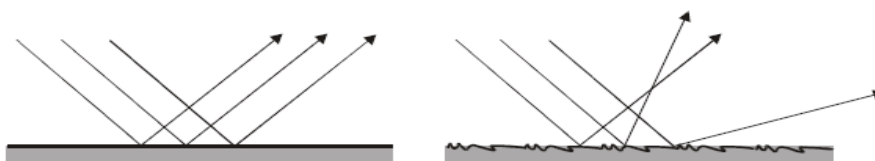
Zákon odrazu: Je-li světlo odráženo od povrchu, rovná se úhel odrazu úhlu dopadu.^[1]

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

2.1.3 Odraz od nedokonale odrazivého povrchu

V reálném světě je nutno počítat s tím, že dokonalý odraz od zrcadlové plochy není možný. Odraz komplikují dvě příčiny: ^[1]

- Zrcadlová plocha není dokonale rovná
- Ne všechno světlo je odraženo, část je propuštěna a absorbována materiálem zrcadla



Obr. 5 Zrcadlový odraz (hladký povrch) a difúzní odraz (drsňý povrch) [1]

2.1.4 Index lomu

Je poměr rychlosti světla c ve vakuu k rychlosti světla v_λ v určité látce. λ vyjadřuje určitou vlnovou délku, pokud není dána, předpokládá se, že se jedná o sodíkové světlo vlnové délky 589,3 nm. Rychlost světla ve vakuu je rovna 299792458 m·s⁻¹, ale převážně se počítá s $3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹. Čím je index lomu větší, tím se světlo pohybuje v daném prostředí pomaleji. ^[1]

$$n = \frac{c}{v_\lambda} [-] \quad (2)$$

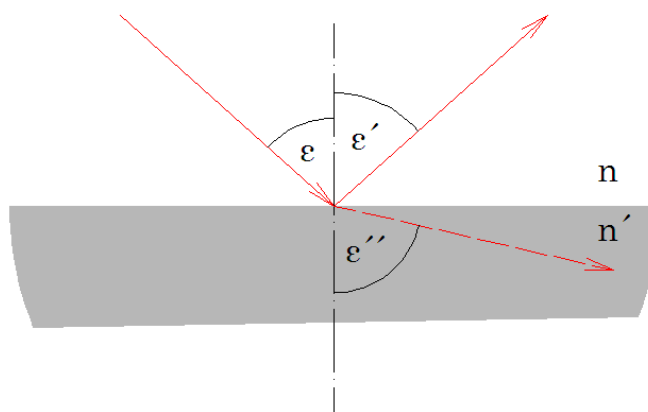
Tab. 1 Ukázka indexů lomu v různých látkách^[1]

Látka	Index lomu n	Rychlost světla v látce v
Absolutní vakuum	1	$v = c$
Vzduch	1,0003	$v = 0,9997c$
Voda	1,33	$v = 0,75c$
Sklo	$1,4 < n < 1,8$	$0,56c < v < 0,71c$
Diamant	2,4	$v = 0,42c$

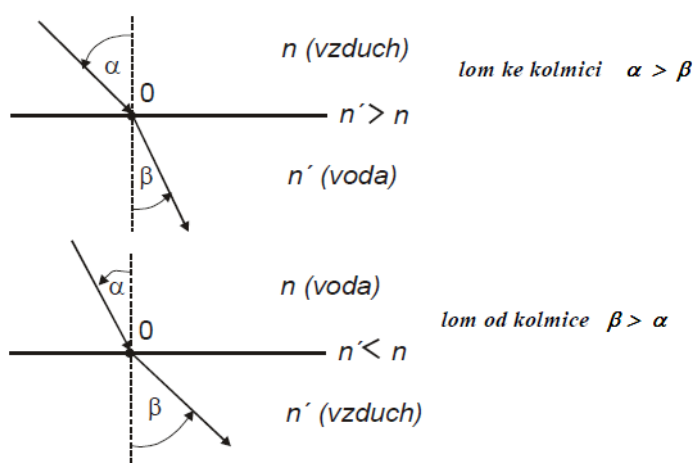
Křemík	3,5	$v = 0,29c$
--------	-----	-------------

2.1.5 Zákon lomu světla – Snellův zákon

Snellův zákon je odvozen z Fermatova principu. Dopadne-li paprsek jednobarevného světla v prostředí o indexu lomu n na rozhraní, které je odděluje od jiného prostředí o indexu lomu n' , dělí se obecně na dva paprsky, které postupují od místa dopadu se změněnými směry. Jeden z nich postupuje do prostředí druhého tzv. *paprsek lomený* a druhý zůstává v prvním prostředí tzv. *paprsek odražený*. Jak je vidět na obrázku Obr. 6. Snellův zákon potom zní $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$ [4]



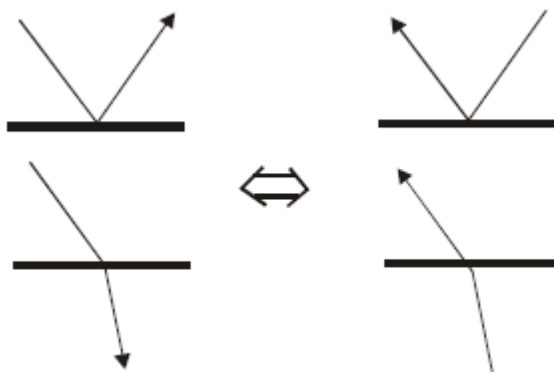
Obr. 6 Lomený a odražený paprsek[4]



Obr. 7 Šíření světla na rozhraní voda, vzduch[1]

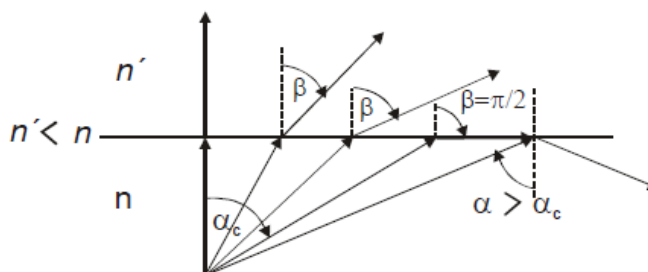
2.1.6 Princip reverzibility paprsků

Pokud je změněn směr paprsku v optické soustavě, pohybuje se stále po stejné dráze jako před změnou směru. ^[1]



Obr. 8 Změna směru paprsku[1]

K totálnímu odrazu paprsků dojde, pokud se světlo pohybuje v hustém prostředí a dopadá na rozhraní s řidším prostředím, pod úhlem větším než je úhel mezní.



Obr. 9 Totální odraz[1]

Snellův zákon lomu zní pak $n \cdot \sin \alpha_c = n' \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$ a kritický úhel se pak vypočítá jako $\alpha_c = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right)$.

Princip totálního odrazu se využívá v optických vláknech pro udržení světla v jádru. ^[1]

2.2 Výroba optických vláken

V této kapitole budou popsány technologie a postupy výroby pro optická vlákna skleněná, křemenná a plastová.

2.2.1 Materiály pro optická vlákna

Škála materiálů používaných na výrobu optických vláken je velice široká. Pro přípravu optických vláken pro vlnové délky do 1600nm jsou v současné době používány speciální velmi čistá skla, syntetický křemen, některé typy plastů nebo jejich kombinace křemene a plastů.

2.2.1.1 Sklo

Skla patří k nejstarším druhům materiálů používaných na výrobu optických vláken. Ze silikátových skel jsou používány sodnovápenatá, boritokřemičitá, fosforečnatokřemičitá, alkalicko-olovnatá, pro gradientní optická vlákna zase skla s vysokým obsahem GeO_2 . Teploty zpracování těchto materiálů bývají 1200 až 1500°C, například u křemenného skla je to teplota přes 2000°C. Tyto nižší teploty přinášejí některé technologické výhody, např. možnost používat některé jednoduché sklářské postupy. Požadavky jsou velice vysoké, je zapotřebí používat při výrobě velmi čistou surovinu (sklo) a zamezit jakémukoliv dalšímu znečištění v průběhu technologického procesu.^[2]

2.2.1.2 Syntetický křemen

Syntetický křemen je nejpoužívanější materiálem v dnešní době. Tento materiál umožňuje přípravu velice kvalitních preforem. Metody přípravy preforem jsou výrazně odlišné od práce se skleněnými materiály. Používány jsou výlučně metody chemického vylučování velmi čistého SiO_2 z par (CVD metoda). K dosažení potřebného rozdílu indexu lomu jádro-plášť nebo profilu indexu lomu jsou použity příměsi např. oxidy Ge, Al, Ti, Nb, Zr, Ta, Sn, P, La (zvyšují index lomu) a B, F (snižují index lomu).^[2]

2.2.1.3 Plast

Plasty jsou použity na celoplastová optická vlákna, nebo v kombinaci s křemenným vláknem. Nejpoužívanějším materiálem je PMMA. U kombinovaných je plast používán jen jako plášť např. polyvinylidfluorid, polyperfluóretylénpropylén a

polymetylsiloxan. Polymetylsiloxany jsou z hlediska technologie a vysoké čistoty považovány za nejperspektivnější plasty na výrobu optických vláken.^[2]

2.2.1.4 Speciální materiály

Speciální materiály jsou používány převážně jako primární ochrana povrchu optických vláken. Tyto materiály jsou použity na ochranu vláken proti vlhkosti, mechanickým vlivům, k netečnosti k povrchu vláken, k velké rychlosti nanášení nebo snadné odstranitelnosti atd. Nejčastěji jsou použity epoxiakryláty, etylénvinylacetáty, polybutadieny a silikony.^[2]

2.2.2 Příprava preformy

Preforma je základní útvar, ze kterého je následně dlouženo optické vlákno, zachovává proporce mezi jádrem a pláštěm. Preforma je asi 30 až 40 krát větší než rozměry vlákna. Průměr preformy je asi 10mm a délka asi 40cm. Příprava se dělí:

- Příprava čistých sklovin
 - klasická tavná technologie
 - depozitní technologie – depozice par
- Příprava křemenných sklovin
 - OVPO technologie (Outside vapour phase oxidation process)
 - VAD technologie (Vapour axial deposition)
 - MCVD technologie (Modified chemical vapour deposition)
 - PCVD technologie (Plasma-activated chemical vapour deposition)
- Příprava gradientních polymerních optických vláken
 - Technika gelové polymerizace povrchu
 - Odstředování
 - Fotochemická reakce
 - Extrusion – vytlačování

2.2.2.1 Příprava čistých sklovin

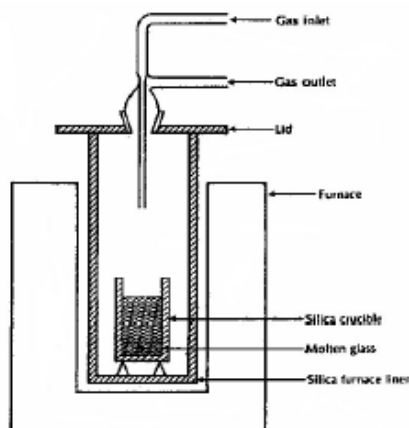
2.2.2.1.1 *Klasická tavná technologie*

Jedná se o vylepšenou technologii, kterou používají skláři. Nejprve je připraven ultra čistý prášek skloviny, nejčastěji z SiO_2 , GeO_2 , B_2O_2 , Al_2O_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , BaCO_3 .

Dále je z tohoto prášku vytvořena tavenina bez bublin. K tomu je využíváno nízkoteplotní tavení kolem $900 - 1300^\circ\text{C}$. Při tom dochází ke změně indexu lomu díky změně složení a iontové výměně. Celý tavící proces probíhá v platinovém kelímku. Aby se zamezilo znečištění skloviny, je používán VF indukční ohřev (kolem 5MHz)

V dalším kroku je tavenina zbavena OH iontů, probubláváním vysoušecího plynu. Ten většinou bývá předeřhřátý a tím také ohřívá taveninu.

Posledním krokem je odlití skloviny do preforem. Z těchto preforem se poté taví vlákno.^[3]



Obr. 10 Princip tavení skloviny[3]

2.2.2.1.2 *Depozitní technologie – depozice par*

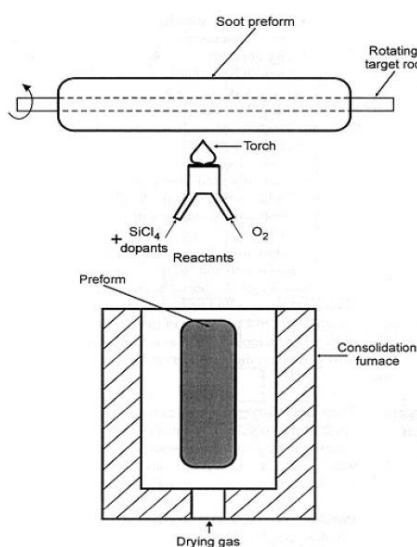
Jedná se o technologii, která využívá principu destilace. Sklo je odpařeno a skelná pára je usazena na „kondenzační destičce“ v superčistém stavu. Tato technologie je velmi energeticky náročná, ale poskytuje nejčistší sklovinu vůbec. Navíc je docela propracovaná z výroby polovodičů.^[3]

2.2.2.2 Příprava křemenných sklovin

2.2.2.2.1 *OVPO technologie (Outside vapour phase oxidation process)*

Tato technologie měla ve svých počátcích útlum přes 20dB/km. Dnes poskytuje velmi dobré výsledky s útlumy kolem 0,25dB/km. Tato technologie dovoluje vyrábět vlákna délky až do 100km. Jednou z nevýhod této technologie je vyrábění nosného členu (tyče), na který jsou nanášeny jednotlivé vrstvy skloviny.^[3]

Během procesu OVPO jsou částice SiO_2 nanášeny horizontálně na povrch formy na vnější stranu, jak znázorňuje horní část obrázku Obr. 11. V dolní části obrázku je znázorněna pírka, kterou zásobuje topný plyn (vodík nebo metan) smíšený s SiCl_4 . Plyn prochází po celé délce rotujícího prutu. Po depozici částic je prut odstraněn. Preforma je následně vystavena vysoké teplotě a sušením za účelem snížit množství OH iontů, které zbytečně absorbují světlo.^[3]



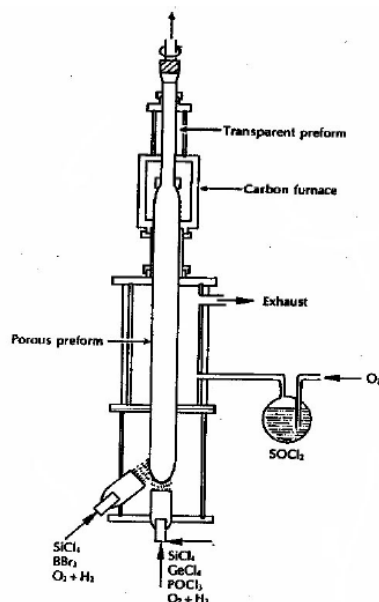
Obr. 11 Výroba preformy technologií OVPO[3]

2.2.2.2.2 *VAD technologie (Vapour axial deposition)*

Tato technologie je velice zajímavá, protože dovoluje vyrobit téměř jakýkoliv profil indexu lomu. Sklo je umístěno vertikálně uvnitř trubky a částice se nanášejí na konec této trubky, jak je možno vidět na obrázku Obr. 12. Jedná se o objemové osazování skla na zárodku. Trubka je postupně vytahována z pece, což umožňuje výrobu velmi dlouhé preforem. Zpevňování materiálu může být prováděno ve zvláštním procesu.^[3]

Největší rozdílem mezi touto technologií a technologiemi OVPO a MCVD je, že požadovaný profil preformy je zde docílen pomocí vhodné geometrie pece, nikoliv časovou obměnou poměru plynů v mixtuře.

VAD technologie umožňuje vyrábět až 100km délky vlákna.^[3]

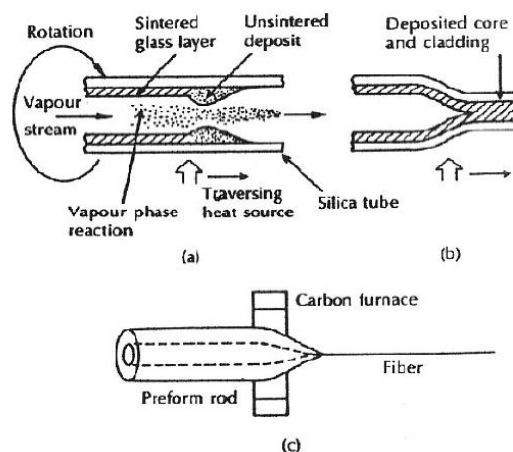


Obr. 12 Výroba preformy technologií VAD[3]

2.2.2.2.3 *MCVD technologie (Modified chemical vapour deposition)*

Dneska je touto technologií vyráběna ta nejjakostnější vlákna. Směs chemických substrátů, která je průběžně monitorována prochází přes rotující skleněnou tubu z čistého syntetického křemíkového skla SiO_2 . Plyn protéká tubou a probíhá depozice, což znamená osazování pevných částic na vnitřní straně. V reakci na teplo, je tato osazená vrstva proměňována v transparentní sklo. Tento proces je opakován několik hodin, až se vytvoří celé jádro.

Po depozici par je nutné preformu ještě smrštít ve smršťovací peci. Tato technologie je dneska schopna vyrobit až 50km vlákna.^[3]

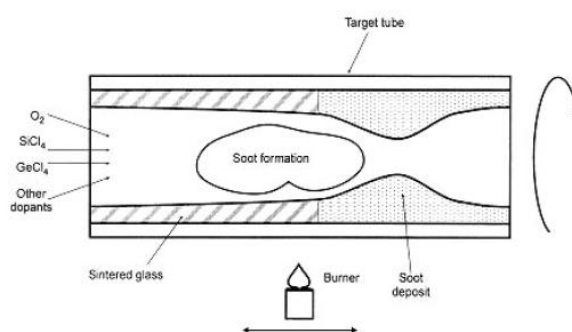


Obr. 13 MCVD technologie[3]

2.2.2.2.4 *PCVD technologie (plasma-activated chemical vapour deposition)*

Tato technologie je nejmladší a poskytuje nejpresnější profily indexu lomu. Technologie je velmi podobná předchozí MCVD, ale u této technologie je využívána aktivní plazma (teplota až 9000°C). Depozice je uvnitř trubky. Mikrovlny, které jsou místo pece, jsou použity pro ohřev regionu depozice. Proces je pomalý, ale velmi přesný. Tloušťka vrstev je 0,1μm. Je využíváno velmi krátkých mikrovlnných pulzů pro docílení větší přesnosti.

Přes všechny výhody, které tato technologie má, je zatím velmi drahá. [3]



Obr. 14 Výroba preformy pomocí PCVD technologie[3]

2.2.2.3 Příprava gradientních polymerních optických vláken

2.2.2.3.1 *Technika gelové polymerizace povrchu*

Tuto metodu vyvinul profesor Koike z Univerzity Keio. V tomto procesu je tubus původně vyroben z PMMA. Následně je naplněn směsí dvou různých monomerů. První monomer má vyšší index lomu a větší molekuly a druhý monomer má menší index lomu a menší molekuly. Potom je vnitřní stěna PMMA tubusu natavená v peci o teplotě 80°C. Tím vznikne vrstva gelu a urychlí se polymerace. Menší molekuly z prvního monomeru jsou tak lehce rozšířeny do této gelové vrstvy a tím je koncentrace druhého monomeru zvýší ke středu. Profil indexu lomu je takto formovaný ve shodě s výslednou gradientní koncentrací. ^[5]

2.2.2.3.2 *Odstřed'ování*

Tento proces využívá různých hustot různých monomerů k vytvoření profilu indexu lomu prostřednictvím odstředivé síly v rychlém odstředivém procesu.

Výroba preforem je rozdělena do dvou kroků. Za prvé je naplněna trubice směsí monomerů, gradientní profil je formovaný za pokojové teploty. Za druhé je navýšena teplota a přichází na řadu polymerizace. Rotace pokračuje celým procesem, rychlost je asi 50000 otáček za minutu. Nakonec je vlákno taženo. ^[5]

2.2.2.3.3 *Fotochemická reakce*

PMMA je v tomto procesu dopovaný dimetylamínofenylem. Vystavením ultrafialovým zářením (380nm) je index lomu snížen až na 0,028. Vlákná tímto způsobem nejsou zatím nevyráběna. Pravděpodobně kvůli problému s hloubkou penetrace záření, které je význačně menší než poloměr zamýšleného vlákna. ^[5]

2.2.2.3.4 *Extrusion – Vytlačování*

Proces vytlačování je velice jednoduchý. Používáno je převážně na optická vlákna SM (jednovidová) a SI (se skokovou změnou indexu lomu). Tato metoda je velice citlivá na znečištění a změny tloušťky vrstev vlákna. Proto je vhodná spíše pro

výrobu vláken na méně náročné aplikace. Výkon takto vyrobeného vlákna je 400Mbit/s při vzdálenosti až do 100m.

Extrudér je plněn granulovým polymerem a jsou vytlačována vlákna, která se už téměř blíží svému konečnému průměru. Vytlačování je omezeno velmi malými průměry. Hodně malé průměry by mohly ovlivnit optické vlastnosti.

Během několika posledních let vyvinula Conex Cables Oy novou unikátní kónickou technologii vytlačování. Tato technologie umožňuje vyrábět gradientní optická vlákna. Ovšem tato metoda není zatím životaschopná pro kontinuální výrobu. ^[6]

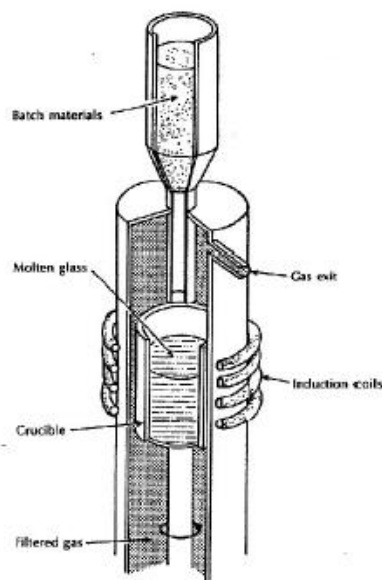
2.2.3 Tažení vláken

Tažení optických vláken je důležitou operací, která může ovlivnit některé důležité vlastnosti např. útlum, pevnost a rozměrové odchylky. Teplota preformy je během tažení asi 2000°C. Konec preformy je tažen gravitací a pak pomocí válce ve spodní části. Vláknem je následně navíjeno na cívku. Rychlost tažení má vliv na poloměr vlákna, pokud je průměr vlákna větší než je předpokládané, rychlost se zvýší. Jsou dvě metody tažení: ^[3]

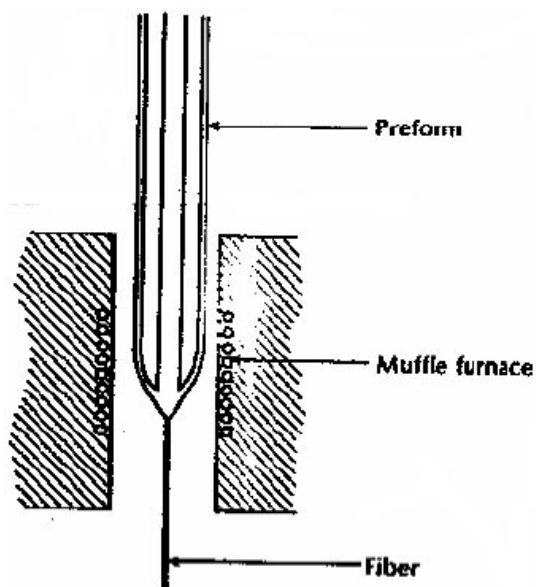
- Klasická technologie – tyčka v trubce
- Metoda dvojitého kelímku

2.2.3.1 Klasická technologie – tyčka v trubce

Jde o relativně jednoduchou tažnou technologii, která je levná, ale nelze snít dosáhnout malých útlumů, protože nemá řízené rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Touto technologií je možno vyrábět pouze SI vlákna velkých rozměrů. Lze se s touto technologií také setkat pod názvem tyčka v trubce (Rode in Tube). ^[3]



Obr. 15 Princip indukčního ohřevu[3]

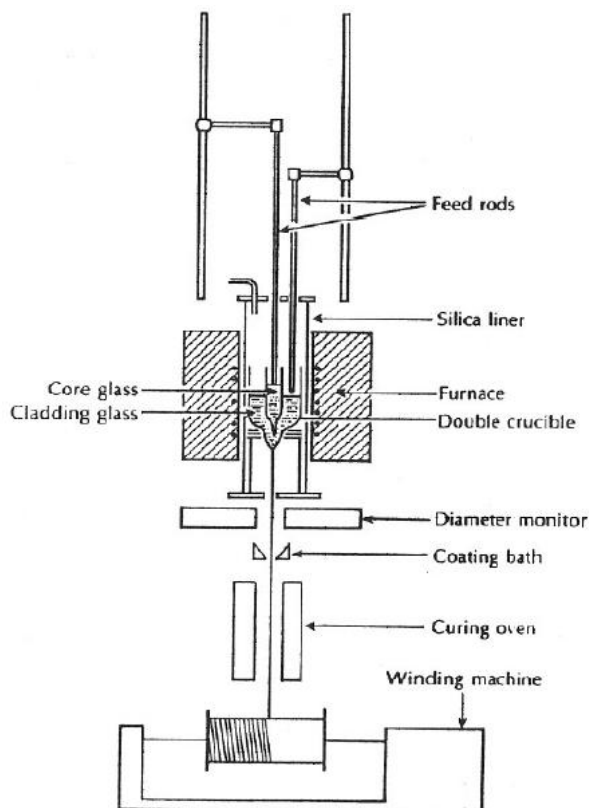


Obr. 16 Princip tažení vlákna[3]

Hlavní výhodou je jednoduchost. Určitou nevýhodou naopak je, že geometrické a strukturální nerovnosti vnitřního povrchu trubky a vnějšího povrchu tyčky se mohou projevit jako poruchy rozhraní jádro – plášť, které způsobují rozptylové ztráty. Metoda je použitelná v omezeném rozsahu pro levná mnohovidová vlákna SI s velkou numerickou aperturou. Nejnižší dosažitelný útlum je cca 7dB/km a $NA=0,6$.^[3]

2.2.3.2 Metoda dvojitého kelímku

Touto technologií je možno vyrábět velmi dlouhá vlákna a dokonce i s gradientním průběhem indexu lomu. Geometrické rozměry závisí na rychlosti tažení a na teplotě těsně za hrotem obou kelímků. Proto je do tohoto místa zaostřen CO laser, který velmi rychle reaguje na změny teploty nebo na změny v rychlosti tažení. [3]



Obr. 17 Metoda dvojitého kelímku[3]

Výhodami této metody je např. poměrně velká rychlost tažení (100m/s), možnost kontinuálního tažení a možnost měnit poměr průměrů jádra a pláště. Další výhodou je zlepšení rozhraní jádro – plášť, bylo dosaženo hodnot útlumu <5dB/km a $NA=0,5$. [3]

2.3 Druhy optických vláken

Základní rozdělení optických vláken vychází z konstrukce jádra. Podle průměru jádra a profilu indexu lomu jsou vlákna dělena:

- Mnohovidová – MM Multi Mode
 - SI – se skokovou změnou indexu lomu

- GI – gradientní
- Jednovídná – SM Single Mode

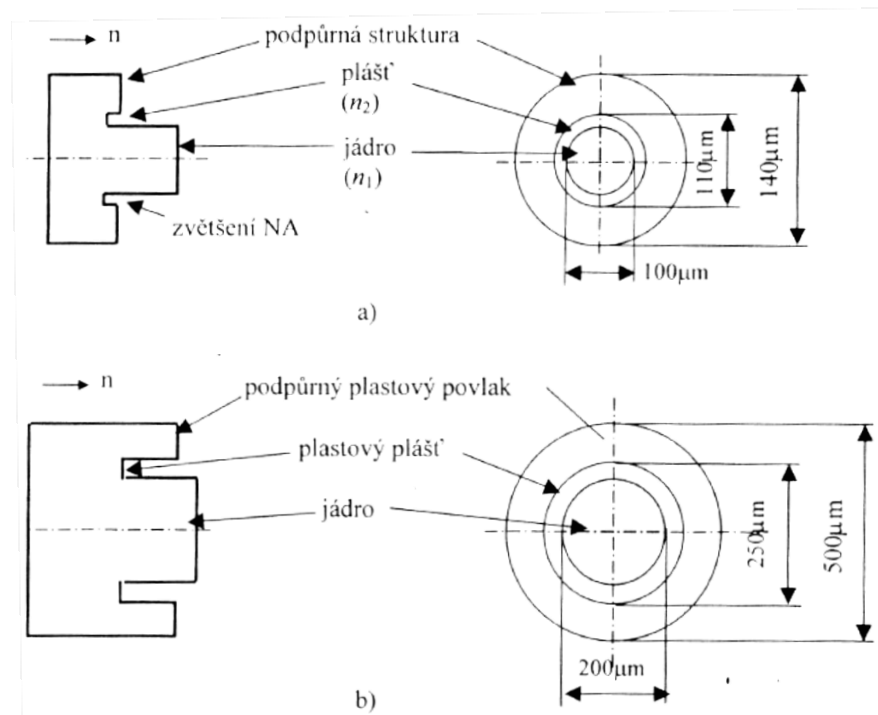
Poloměr jádra a jeho index lomu má rozhodující vliv na výsledné vlastnosti vlákna, zejména na šířící se počet vidů. S poloměrem jádra souvisí také numerická apertura NA a způsob optického výkonu zdroje, kterým je obvykle luminiscenční nebo laserová dioda. ^[2]

2.3.1 Mnohovidová optická vlákna

Mnohovidová optická vlákna jsou schopna vést jádrem více paprsků (vidů) najednou. Jsou to vlákna s velkým průměrem jádra, větším než 10 μ m. Tato vlákna jsou vhodná pro komunikaci na krátké vzdálenosti. Rychlost přenosu se pohybuje okolo 10Mbit/s až 10Gbit/s na vzdálenost do 600m. Výhodou těchto vláken je výrobní cena a snadná manipulace při spojování.

2.3.1.1 Optické vlákno typu SI (step index)

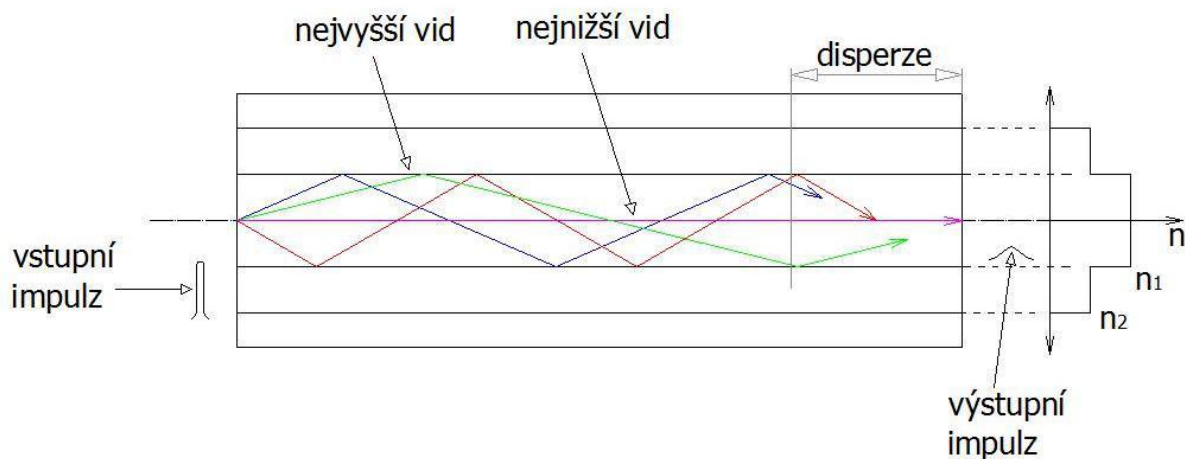
Je standardní vlákno se skokovou změnou indexu lomu. Jeho struktura je patrná z obrázku Obr. 18.



Obr. 18 Optické vlákno SI[2]

Typický poloměr jádra u tohoto typu vlákna je $a = 50$ až $100\mu\text{m}$ ($V > 2,4$). Šíření paprsků (vidů) je založeno na úplném odrazu. Na rozhraní jádro – plášť ($n_1 > n_2$) dochází k ostrému lomu, jak je vidět na obrázku Obr. 19. Jednotlivé vidy vstupují do jádra pod různými úhly, tím pádem se šíří každý po jiné cestě, díky tomu vidy nedorazí na konec vlákna ve stejný okamžik, ale postupně, v této souvislosti mluvíme o disperzi.

Numerická apertura se pohybuje u tohoto vlákna v rozmezí $NA = n_1 \sqrt{2\Delta} = 0,25 \div 0,35$; $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 = 0,021 \text{ až } 0,029$. Standardní vlnová délka je $\lambda_0 = 0,85\mu\text{m}$. Struktura celoskleněného vlákna na obrázku může být upravena náhradou pláště a podpůrné struktury plastovým povlakem s $n < n_1$, čímž vznikne vlákno PCS (plastic clad silica). Přitom poloměr jádra je až dvojnásobný ($a = 100$ až $150\mu\text{m}$), viz obrázek Obr. 18. Výhodou je větší NA a nižší cena, nevýhodou pak je zejména stárnutí pláště, větší ztráta a nižší teplotní odolnost. ^[2,4]



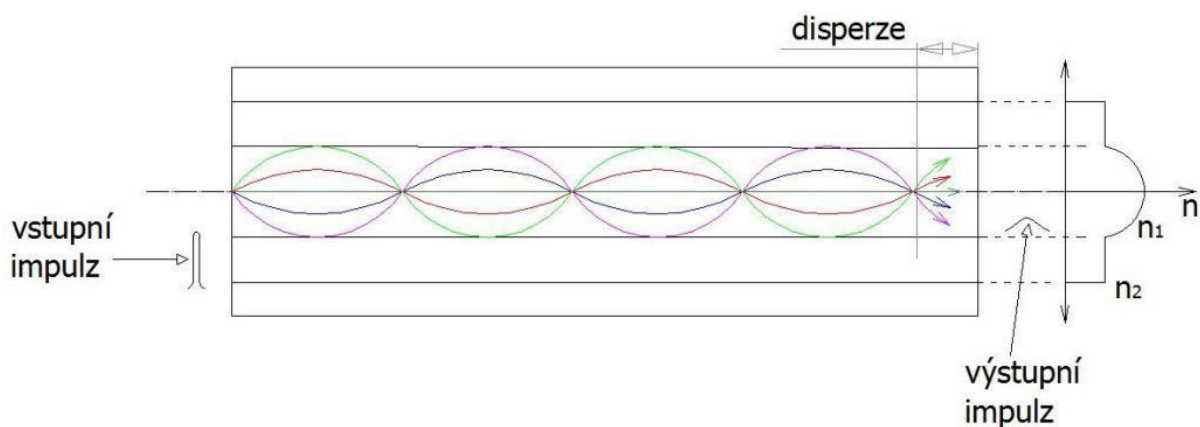
Obr. 19 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou[4]

2.3.1.2 Gradientní optické vlákno GI (Graded Index)

Má speciální úpravu profilu indexu lomu jádra, obvykle podle závislosti

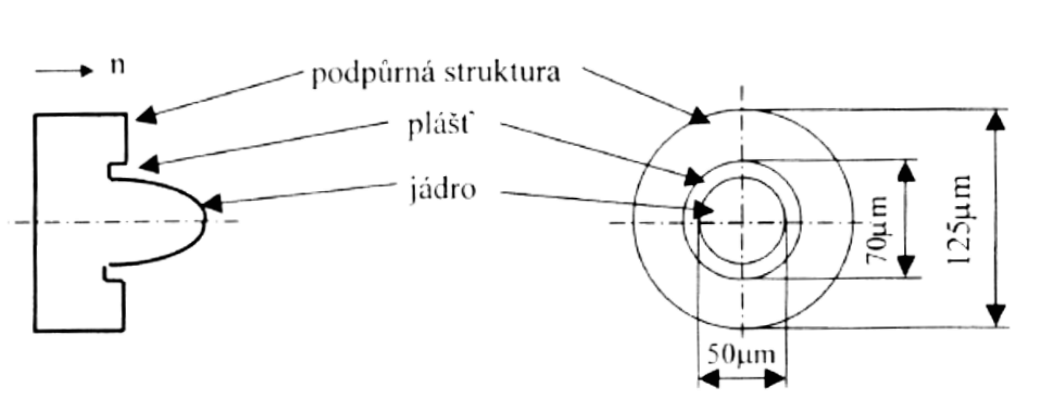
$$n(r) = n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ kde } r < a, \alpha \rightarrow 2 \text{ pro parabolický průběh. To}$$

znamená, že vlákno tvoří 1000 tenkých vrstviček. Každá vrstva má odlišný index lomu, a je snižován se vzdáleností od středu vlákna. Díky tomu paprsky (vidy) opisují sinusoidu jak je vidět na obrázku Obr. 20. Tím je také snížena disperze, protože se vidy dostanou na konec vlákna zhruba ve stejnou dobu.



Obr. 20 Mnohovidová vlákna s gradientní změnou[4]

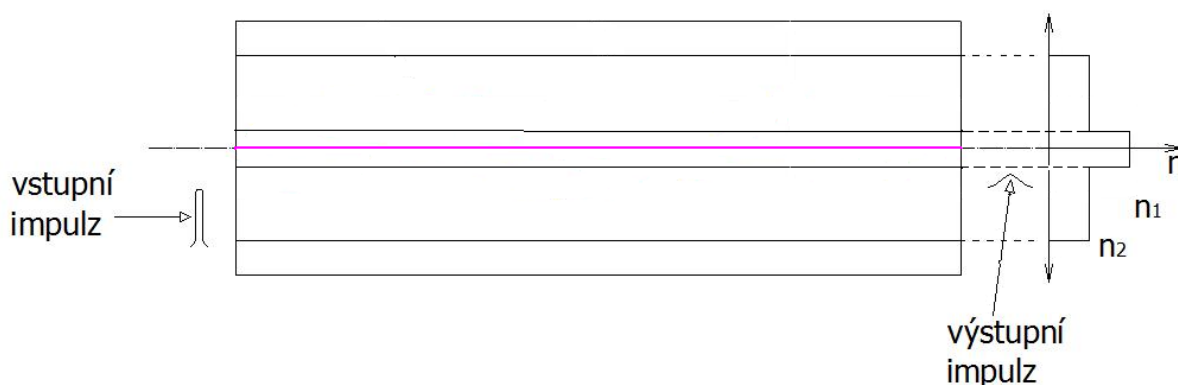
Na obrázku Obr. 21 je zobrazen typický profil tohoto vlákna s průměrem jádra $50\mu\text{m}$ (používá se rovněž průměr $62,5\mu\text{m}$), $NA = 0,18 \div 0,24$. Vláknem se využívá pro vlnové délky 850 a 1300nm. ^[2, 4]



Obr. 21 Gradientní optické vlákno[2]

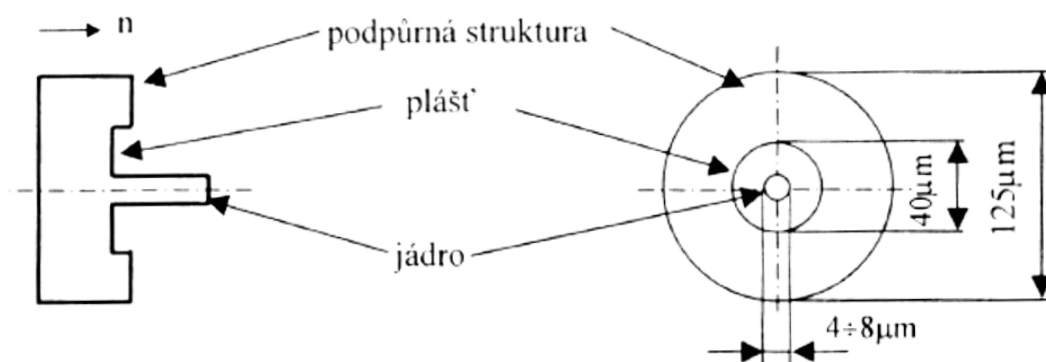
2.3.2 Jednovidová optická vlákna

Toto vlákno vede pouze jeden svazek vidů, a to ve směru své osy bez odrazů viz obrázek Obr. 22. Tomu pomáhá velmi malý poměrný podíl indexu lomu jádro-plášť. Je to také díky malému poloměru jádra, který vede pouze základní vid. Jeho konstrukce vychází ze základního uspořádání SI vlákna, pro které je splněna podmínka pro poloměr a , jenž lze vyjádřit ze vztahu $2\pi a / \lambda_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2,4$. Typická hodnota pro vlákno s vysokým obsahem křemene (high-silica) pro $\lambda_0 = 1\mu\text{m}$, $n_1 = 1,47$, $n_2 = 1,458$ je $a = 2,04\mu\text{m}$. Tyto vlákna vedou pouze jeden svazek vidů, a to ve směru své osy bez odrazů.



Obr. 22 Jednovidové optické vlákno[4]

S ohledem na numerickou aperturu a problémy s navázáním optického výkonu do jádra, je obvykle poloměr jádra vyšší (až $8\text{ }\mu\text{m}$). Přitom je potřeba zajistit, aby v hraniční oblasti pláště bylo pole zanedbatelné. Proto je obálka konstruována obvykle jako dvoustupňová viz obrázek Obr. 23^[2, 4]



Obr. 23 Jednovídné optické vlákno[2]

2.4 Důležité parametry optických vláken

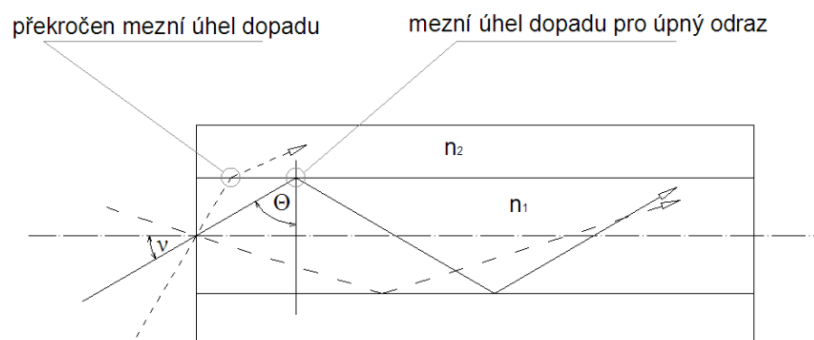
2.4.1 Šířka pásma

Udává nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km mnohovidovým vláknem bez nadměrného zkreslení signálu působením disperze. Je udávána v MHz·Km.

Šířka pásma závisí na konstrukčním uspořádání, na materiálu a na vlnové délce optického signálu. Proto platí, že každý druh vlákna má jinou šířku pásma. U stranově vyzařujících vláken je tato šířka pásma tak malá, že není blíže specifikovaná ^[4]

2.4.2 Numerická apertura

NA je rovna sinu maximálního úhlu ν_{MAX} , pod kterým se prostupující paprsky budou ještě šířit od začátku vlákna až k jeho konci, jak je vidět na obrázku Obr. 24



Obr. 24 Numerická apertura[4]

Paprsky, které dopadají pod větším úhlem než je úhel maximální, vláknem vedeny nebudou. Aby byly paprsky vedeny optickým vláknem, musí dojít k úplnému odrazu paprsku na rozhraní jádra s indexem lomu n_1 a pláště s indexem lomu n_2 . Je-li úhel větší, dojde na rozhraní jádra a pláště k jeho lomu a paprsek se neodrazí, projde do pláště a následně ven z vlákna. ^[4]

$$NA = \sin v = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} [-] \quad (3)$$

2.5 Vlivy působící na ztrátu svítivosti

Stranově vyzařující optická vlákna ztrácí svoji svítivost exponencionálně, v závislosti na vzdálenosti napojení od zdroje světla.

2.5.1 Útlum světelného signálu

Útlum vyjadřuje ztrátu vyslaného signálu, který je závislý na vzdálenosti od zdroje. Útlum je v podstatě měřítkem ztráty optické energie ve vlákně.

U měření přímých optických vláken lze stanovit světlený útlum pomocí rovnice (4), která popisuje pokles vyzařovaného výkonu P se vzdáleností od zdroje podél osy vlákna.

$$P_z = P_0 \cdot 10^{-\alpha \frac{z}{10}} [W] \quad (4)$$

Kde P_0 je naměřený výkon světelné intenzity na začátku vlákna u zdroje světla, P_z je výkon ve vzdálenosti z od zdroje světla a α je součinitel útlumu.

Absorpce a rozptyl světelných paprsků jsou hlavními příčinami útlumu světelného signálu v optickém vlákne. Ztráty vznikají: ^[4]

- Přímě v materiálu vlákna
- Na rozhraní prostředí vlákna
- Při spojování vláken
- Na mikroohmech optických vláken

2.5.2 Ztráty z důvodu znečištěného materiálu vlákna

Tyto ztráty jsou způsobeny molekulami nečistot, které se dostávají do vláken při jeho výrobě. Díky těmto nečistotám mohou vznikat lomy a odrazy některých paprsků, které se díky tomu tříští do všech směrů. Tyto odkloněné paprsky mohou proniknout do pláště a následně ven z vlákna a tak dojde ke ztrátě vedeného paprsku. ^[4]

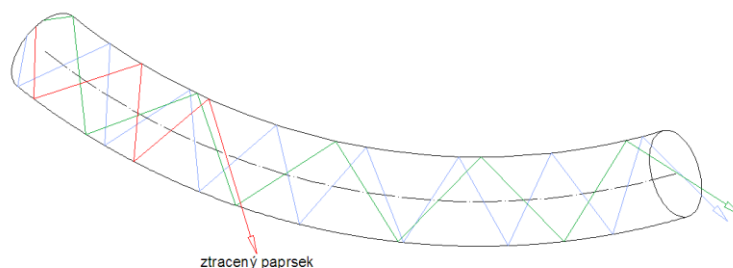
2.5.3 Vidová disperze

Vidová disperze vzniká v mnohovidových optických vláknech. Jedná se o různé skupinové rychlosti jednotlivých vidů, což má za následek rozdílné doby průchodu vláken. Při šíření impulsu vláknem tedy dojde k jeho rozšíření. Vidová disperze omezuje rychlost, se kterou mohou být dva po sobě jdoucí impulzy vyslány, aniž by během šíření došlo k jejich překrytí, tj. rychlost, s jakou může optický vlákenný komunikační systém pracovat.

Vidovou disperzi lze snížit vhodným příčným profilem indexu lomu, který má největší hodnotu v ose jádra a směrem k plášti postupně klesá, přičemž na jejich rozhraní dosáhne minima. Toto vlákno se nazývá gradientní nebo vlákno s postupnou změnou indexu lomu. ^[2]

2.5.4 Ohyb vlákna

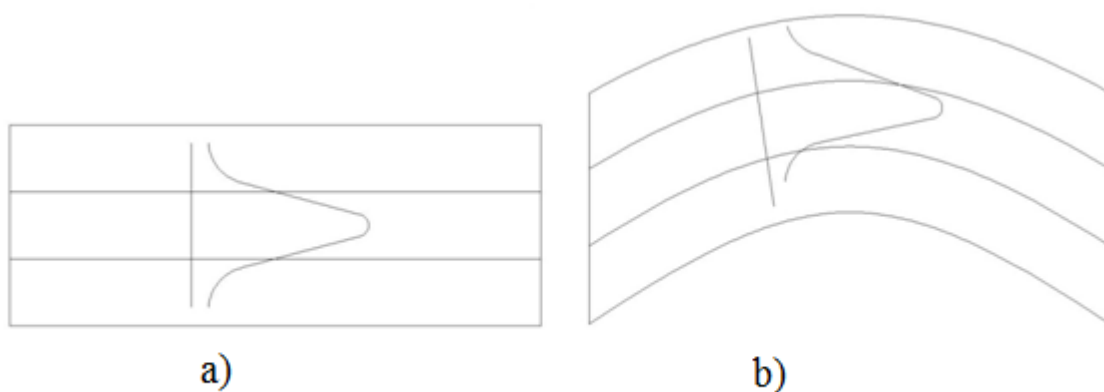
Je-li optické vlákno ohýbáno, dochází tak ke změnám úhlů dopadu a odrazu přenášejících paprsků. Čímž dochází k překročení mezní hodnoty úhlu odrazu a paprsek se neodrazí zpět do jádra, nýbrž pronikne do pláště a následně ven z vlákna. To způsobí, že výstupních paprsků je méně, než bylo vysláno. ^[4]



Obr. 25 Šíření paprsku v ohybu vlákna[4]

2.5.4.1 Makroohyb

Je způsoben vlastním ohybem vlákna. K útlumu signálu dochází tak, že část vidu, která se nachází na vnější straně ohybu vlákna, je vyvedena (vyzářena) z vlákna viz obrázek Obr. 26. Aby vid nebyl vyveden, tak by musel být šířen větší rychlostí, než je rychlost světla v daném prostředí, což je v praxi nemožné. Pak by byla splněna podmínka kolmosti vlnoplochy ke směru šíření a vid by zůstal uvnitř vlákna. V diplomové práci Ing. Meryové bylo dokázáno, že intenzita vyzařování při ohybu závisí na podílu poloměru vlákna a poloměru ohybu.^[12]

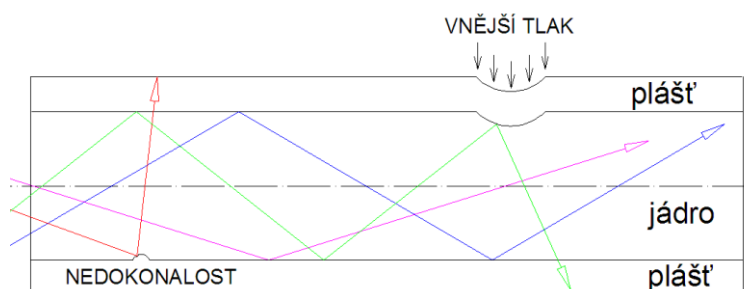


Obr. 26 a) vid v napřímeném vlákně, b) vid při ohybu vlákna[12]

2.5.4.2 Mikroohyb

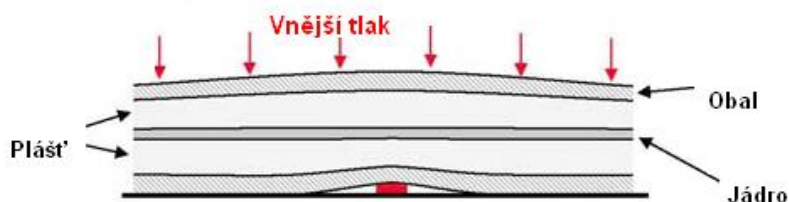
Tyto ztráty jsou způsobeny kvůli drobným nedokonalostem povrchu vlákna. Jedná se o drobné poruchy přímocárosti osy optického vlákna a vzhledem k tomu, že

výskyt je zcela náhodný po celé optické trase, mohou v konečném důsledku způsobit značný útlum. Mikroohyb vzniká i při výrobě, kdy dochází k nesteromernému odtahu a tak vzniká jistá variabilita v průměru těchto vláken. Na obrázku Obr. 27 je ukázáno, jak světelné paprsky po střetnutí s mikroohybem jsou vyvedeny ven z vlákna. ^[12]



Obr. 27 Mikroohyb způsobený při výrobě[12]

Mikroohyb může vzniknout i při užívání, kdy na vlákno působí tlak z okolí Obr. 28. Tím dojde k prohnutí vlákna, které způsobí vyvedení přenášeného signálu. Výskyt mikroohybu a jeho podíl na celkovém útlumu je velmi těžké počítat, ale je možné ho určit experimentálně pomocí statistických metod. ^[12]



Obr. 28 Mikroohyb vlákna[12]

2.5.5 Obsah OH skupin

Zbytková vlhkost, která byla ve vláknu ponechána v průběhu výrobního procesu ve formě iontů OH⁻, způsobuje na některých vlnových délkách absorpci optického záření. Proto jsou rozlišovány vlákna s vysokým a nízkým obsahem OH⁻. ^[4]

2.5.6 Lineární rozptyl

Ve struktuře vlákna není ideální homogenita. Tím je myšleno, že jádro není v přímém kontaktu s pláštěm. Na těchto nehomogenitách se v důsledku lomů a odrazů

„tříští“ paprsky do všech směrů a tato část energie se ztrácí. Toto je hlavní složka útlumu optických vláken. ^[4]

2.5.7 Světelná intenzita

Světelná intenzita je definována jako světelný tok (tok energie) dopadající na určitou plochu. Je udána podílem světelného toku W a plochou m^2 , na kterou světelný tok dopadá. ^[4]

$$I = \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

2.6 Použitý materiál

Nejčastějšími materiály na výrobu optických vláken jsou PMMA a PC. Z těchto materiálů byla vyrobena i optická vlákna zkoumána v diplomové práci. V této kapitole budou nastíněny základní informace o použitých materiálech od prvopočátku jejich vzniku.

2.6.1 Plasty

Materiály PMMA a PC jsou zařazovány do plastů. Plasty neboli plastické hmoty (umělé hmoty), označují řadu syntetických nebo polysyntetických polymerních materiálů. Plasty mohou být formovány do předmětů, filmů nebo vláken.

Plasty vznikají jednoduchou chemickou reakcí polyreakce (polymerace, polykondenzace a polyadice).

Tato jednoduchá chemická reakce je mnohokrát opakována, takže původní nízkomolekulární sloučenina monomer přechází ve vysokomolekulární látku zvanou polymer. Plastem se polymer stává poté, co je smíchán a smísen s nezbytnými přísadami a převeden do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování, např. do formy granulí, prášků, tablet, apod. – obecný termín polymer představuje chemickou látku, zatímco plast je technický materiál, který musí mít vhodné užité vlastnosti. ^[7]

2.6.1.1 Polymerace

Je řetězová reakce, při níž jsou molekuly jednoduché organické sloučeniny sloučeny a tvoří makromolekulární látky bez vzniku vedlejšího produktu. Polymerovat může pouze ta sloučenina, která má alespoň jednu dvojnou vazbu, např. ethylen, propylen, vinylchlorid atd. (násobná vazba mezi uhlíkem a jiným atomem – O, N, S). Pokud reagují stejné monomery, vzniká homopolymer. K tomu aby reakce proběhla, jsou používány látky zvané iniciátory. ^[8]

Podle typu iniciátoru je reakce rozdělena na radikálové a iontové.

- Radikálová polymerace
 - 3 části: iniciace, propagace, terminace.
- Iontová polymerace
 - aniontová polymerace a kationová polymerace.
- Koordinační polymerace
 - vznikají prostorově uspořádané polymery.

2.6.1.2 Polykondenzace

Je stupňovitá reakce, při které reagují dva stejné nebo různé monomery, které obsahují dvě nebo více reakčních funkčních skupin. Při polykondenzaci vznikají vedlejší produkty (nízkomolekulární látky – voda). Významnými produkty polykondenzačních reakcí jsou polyamidy a polyester. ^[8]

2.6.1.3 Polyadice

Polyadice je definována jako stupňovitá reakce bez oddělení nízkomolekulární sloučeniny. Monomery musí obsahovat dvě nebo více reakčních funkčních skupin. Příkladem je reakce diisokyanátů a diolů. ^[8]

2.6.2 Nadmolekulární struktura

Nadmolekulární strukturou je myšleno míra (stupeň) uspořádání molekul v polymeru. Jsou známy dva stavy uspořádání, a to amorfní stav a krystalický stav.

2.6.2.1 Amorfní stav

Molekuly jsou statisticky neuspořádané nebo orientované, aniž by byla jejich vzájemná vzdálenost nějak pravidelně rozdělena. Touto strukturou nelze proložit body žádné mřížkové roviny. Existence amorfního stavu je zapříčiněna, buď to tím že boční skupiny jsou složité nebo obsahují atomy o velkém poloměru, nebo že sférické zábrany omezují sklon ke krystalizaci. Základními morfologickými útvary této struktury jsou globuly (klubička) o velikosti 10-30nm. Na obrázku Obr. 29 je vidět struktura amorfních plastů a) lobus, b) uspořádaný globul, c) svazek ^[9]

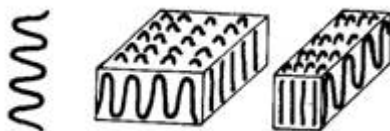


Obr. 29 Nadmolekulární struktura amorfních plastů

Do amorfních plastů patří např. i zkoumané materiály PMMA a PC, dále pak polystyrénové hmoty PS apod. Tyto látky jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) průhledné. Průhlednost je vlastně propustnost světla a to je čiré (92% propustnosti světla), transparentní nebo průhledné (60% propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti je menší než u semikrystalických polymerů. Amorfní polymery lze používat pouze do teploty zesklnění T_g . ^[7]

2.6.2.2 Krystalický stav

Krystalické látky jsou takové, jejichž elementární strukturní jednotky se pravidelně opakují ve třech prostorových směrech a ve stejné vzdálenosti. Složitost vazebných sil a existence vazeb působících v určitém směru jsou příčinou toho, že u polymerů vznikají oproti anorganickým krystalům struktury podstatně složitější. Základní morfologické útvary jsou znázorněny na obrázku Obr. 30 a) proužek, b) lamela, c) fibrila. ^[7]



Obr. 30 Nadmolekulární struktura krystalických plastů

Krystalický podíl je možno vypočítat za použití Avramiho rovnice původně odvozenou pro nízkomolekulární látky.

$$\alpha = 1 - e^{-K_0 t^n} \quad (6)$$

Kde α je podíl krystalické fáze a n leží v rozmezí 3 a 4, kdežto veličina K_0 značně závisí na teplotě a platí že:

$$K_0 = C_1 - \frac{C_2}{kT} \quad (7)$$

Kde T je absolutní teplota, k je plynová konstanta a C_1 a C_2 jsou konstantní koeficienty. ^[9]

Krystalické plasty jsou charakteristické určitým stupněm uspořádanosti. Toto uspořádání je označováno, jako stupeň krystalinity a pohybuje se od 40% do 90% a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Stupeň krystalinity nemůže nikdy dosáhnout 100%, proto jsou tyto plasty označovány jako semikrystalické. Patří sem polyolefiny PE a PP, polyamid PA, tetrafluoretylén PTFE, polyoximetylén POM, atd. Tyto plasty jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a jsou charakterizovány houževnatostí materiálu, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Semikrystalické plasty lze použít pouze do teploty tání T_m . ^[7]

Stav látky lze určit pomocí vztahu pro volnou energii, kde je důležitým členem entropický člen TS .

$$G = H - TS \quad (8)$$

Kde G je volná entalpie, H je entalpie, T je absolutní teplota a S je entropie. ^[9]

2.6.3 Molekulární struktura

Plasty jsou obecně makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší jak 10^4 a z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, která je tvárnitelná za působení teploty T a tlaku p , v její makromolekule se mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka, jako článek řetězce. Základním prvkem tohoto řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce. Existují tři základní druhy polymerních makromolekul a to lineární, rozvětvené (termoplasty) a zesíťované (kaučuky, reaktoplasty).^[7]

2.6.3.1 Lineární

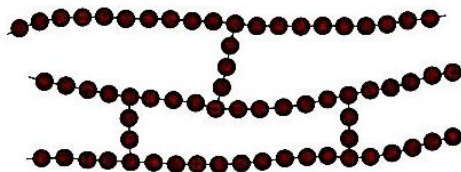
Monomer obsahuje dvě funkční skupiny. Vznikající řetězce jsou vzájemně spojeny vedlejšími vazebnými silami. Lineární molekuly vytvářejí klubka, někdy jsou paralelně orientovány a velmi často vytvářejí částečně krystalické struktury.^[9]



Obr. 31 Lineární uspořádání

2.6.3.2 Rozvětvené

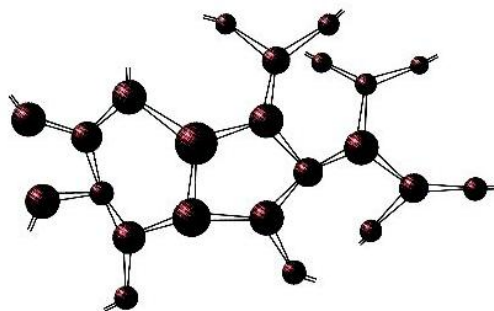
Makromolekuly obsahují buď v pravidelných nebo statisticky rozvětvených vzdálenostech kratší či delší boční řetězce. Zaklesnutí těchto řetězců ovlivňuje vznik tuhé látky.^[9]



Obr. 32 Rozvětvené uspořádání

2.6.3.3 Zesíťované

Vznikly z monomerů, z nichž alespoň část obsahuje tři nebo více funkčních skupin. Jsou to prostorově zesíťované struktury, tvořené nerozpustnými a netavitelnými obřími molekulami. ^[9]



Obr. 33 Zesíťované uspořádání

2.6.4 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Polymethylmethakrylát patří do skupiny esterů kyselin metakrylové. Pro jeho výrobu je nejčastěji použita bloková nebo suspenzní polymerace.

Charakteristickou vlastností tohoto materiálu je jeho čírost a bezbarvost i v tlustých vrstvách. Tyto vlastnosti umožňují dokonalou průhlednost materiálu, i snadné vybarvení. PMMA je snadno tvarovatelný při teplotách 130°C až 140°C kdy přechází do kaučukovitého stavu. Má vynikající tvarovou paměť. To se projevuje tím, že při zahřátí na teplotu T_g se vrací do původního tvaru. Propustnost světla je u PMMA asi 92% v celém rozsahu spektra, zasahuje až do oblasti UV záření. PMMA má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává jak vodě, tak i zředěným alkáliím a kyselinám, avšak neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpustný je v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech, ketonech a etherech. Dá se dobře mechanicky obrábět. Tepelná odolnost bez zatížení je okolo 80°C. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost.

Tab. 2 Teplotní vlastnosti PMMA

Vlastnosti	hodnota
Hustota	1,195 g/cm ³ (0°C)
	1,19 g/cm ³ (20°C)
	1,888 g/cm ³ (25°C)

	1,15 g/cm ³ (skelný přechod)
Teplota tání	160°C
Teplota varu	200°C
Teplota skelného přechodu	105±20°C
Index lomu	1,49
Propustnost světla	90-92%

2.6.5 Polykarbonát (PC)

Polykarbonáty jsou polyestery kyseliny uhličitě. PC na bázi 2,2-bis(4-hydroxyfenyl)-propanu, který se také označován jako dian nebo bisfenol, jsou také snadno přístupné a mají výborné vlastnosti. Vyrábějí se dvěma způsoby: fosgenací nebo reesterifikací.

PC je transparentní materiál s vysokým indexem lomu a s propustností světla 85%. Má dobrou barvitelnost v celém objemu. Je dobře rozpustný v chlorovaných uhlovodících a v cyklohexanonu, nerozpustný nebo těžce rozpustitelný je v esterech, ketonech a aromatických uhlovodících. PC má vysokou rázovou houževnatost i za velmi nízkých teplot, dobrou rozměrovou stabilitu až do 140°C, a také dobré elektroizolační vlastnosti, vysokou mechanickou pevnost a to zejména v tahu. Absorpce vody je nízká. Odolává dobře UV-záření a hydrolýze a stálostí proti oxidaci až do 120°C. PC odolává proti roztokům zředěných kyselin, uhličitanu sodnému a mýdlu. Také alkoholům a afatickým uhlovodíkům. Špatně odolává dlouhodobému působení vroucí vody a páry, aminům, amoniaku a etanolu.

PC se zpracovává běžnými technikami, jako jiné termoplasty. Formuje se z taveniny v rozmezí teplot 220 až 320°C. Pro formování je velice důležité, aby materiál byl dostatečně vysušený, protože PC v tavenině reaguje již se stopovými množstvími vody za snižování molekulární hmotnosti.

Tab. 3 Tepelné vlastnosti PC

Vlastnosti	hodnota
Hustota	1,2 – 1,22 g/cm ³
Teplota tání	267°C
Teplota skelného přechodu	150°C
Index lomu	1,584

Propustnost světla	88%
--------------------	-----

2.7 Aplikace optických vláken

Jak už bylo zmíněno je možno optická vlákna také dělit na *stranově vyzařující* nebo *koncově svítící*. Rozdíl mezi nimi je ve způsobu vyzařování, a proto se aplikují v různých oblastech.

Koncově svítící optická vlákna jsou používána především v telekomunikaci jako nejspolehlivější a nejrychlejší přenos dat na velké vzdálenosti. Dále jsou použita také ve zdravotnictví, jako pomůcka při osvětlení ústní dutiny pro dentisty. Nejčastěji jsou ovšem používána v tzv. fibroskopie, kde pomáhají u endoskopie. ^[4]

Tyto vlákna mohou být použita i v architektuře. To dokázal v roce 2001 maďarský architekt Áron Losonczy. Ten vynalezl nový materiál LiTraCon. Je to nový stavební materiál z betonu a optických vláken, díky nimž přenáší světlo. ^[18]



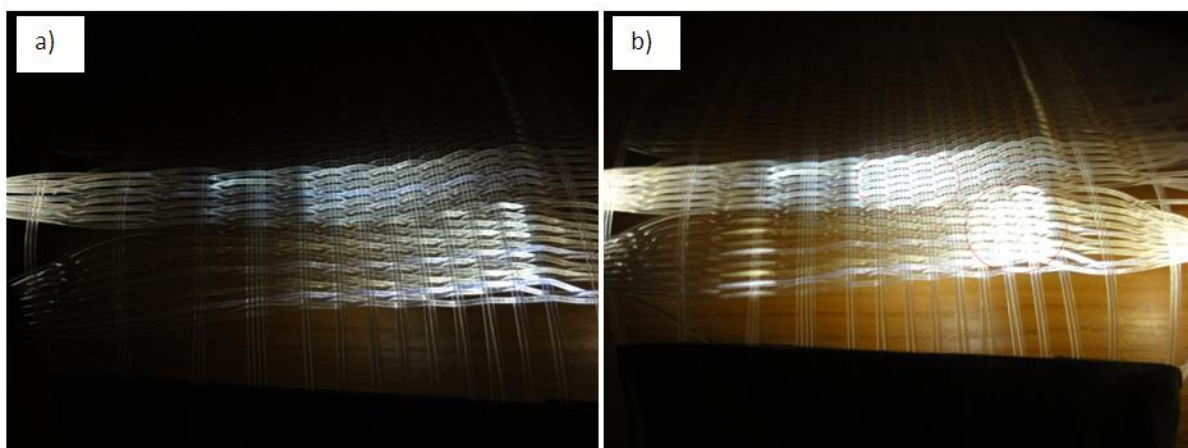
Obr. 34 LiTraCon průsvitný beton[18]

Ovšem koncově svítící optická vlákna nelze bez úpravy povrchu aplikovat v textilu. V textilních výrobcích je priorita, aby vlákna svítla po celé délce a nejen na konci. Z tohoto důvodu je těmto vláknům upraven povrch tak, aby svítla cela.

Úpravy povrchu mohou být mechanické, chemické a termické. Tyto úpravy mohou mít vliv především na mechanické vlastnosti vláken, jako je pevnost, ohebnost, pevnost v tahu atd. ^[12]

Mechanická úprava povrchu

Tuto úpravu lze na vláknech aplikovat buď to při výrobě, nebo při aplikování do textilního výrobku. Povrch optického vlákna lze narušit sérií drsných kartáčů nebo brusným papírem. Touto úpravou lze ovlivnit intenzitu vyzařování. Dá se tak docílit vzorování, nebo zamezit pokles světelné intenzity v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. ^[12]

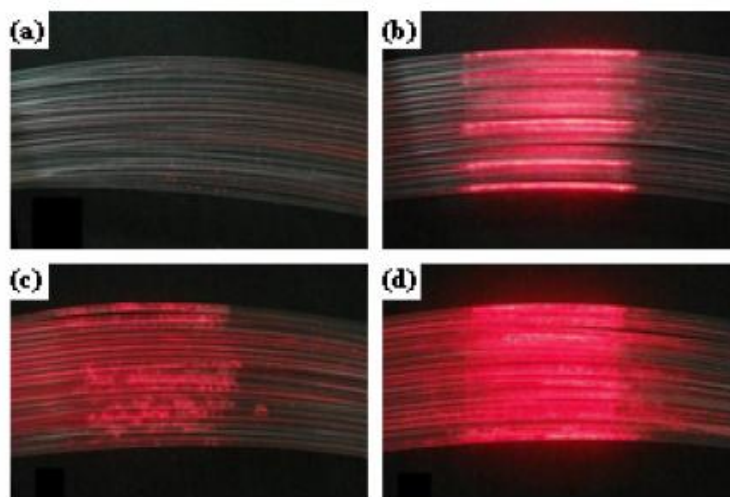


Obr. 35 a) tkanina před odřením b) tkanina po odření^[12]

Na obrázku Obr. 35 je znázorněna tkanina z optických vláken. Vláknem byla použita do osnovy i útku. Místa označená červenými kružnicemi byla obroušena brusným papírem a nasvícena. Lze vidět rozdíl v intenzitě vyzařování. ^[12]

Chemická úprava povrchu

Chemikálie na povrch optického vlákna mohou být nanesena potřením, nastříkáním nebo smáčením. Jednotlivé metody jsou zvoleny podle druhu chemikálie a podle požadavku na konečnou intenzitu vyzařování. Intenzita je také ovlivněna délkou působení chemikálie.

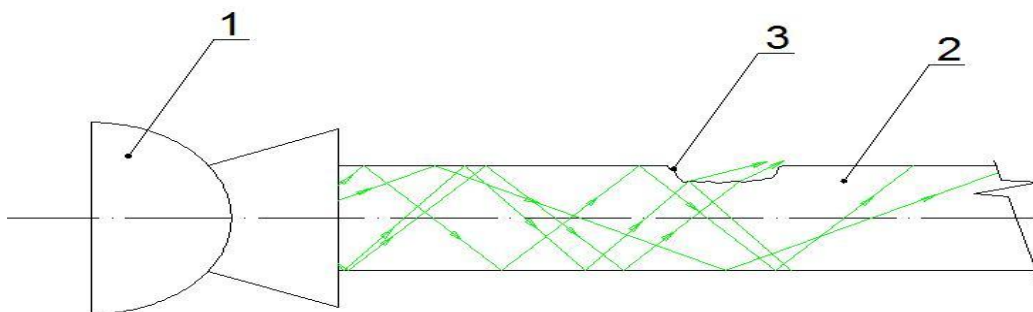


Obr. 36 Různé poškození vláken[12]

Na obrázku Obr. 36 je ukázka různých poškození na koncově svítících optických vláknech. Na obrázku a) jsou koncově svítící vlákna bez poškození, b) jsou tytéž vlákna poškozena brusným papírem, obrázek c) ukazuje poškození povrchu postříkáním rozprašovačem s ethyl-acetátem a na posledním obrázku d) je vidět vlákna obroušená brusným papírem a následně postříkána ethyl-acetátem.^[12]

Termická úprava povrchu

U této metody je nutné brát ohled na použitý materiál a na jeho teplotu tání. Na termické úpravy může být použit laser nebo profilované raznice vyhřívané různými médii. Na vlákně vzniklé poškozené místo lépe svítí, díky malé šířce pásma viz obrázek Obr. 37, kde je 1) zdroj světla, 2) optické vlákno, 3) členité poškození^[12]



Obr. 37 Poškození optického vlákna[12]

Stranově vyzařující optická vlákna se na rozdíl od koncových nemusí nijak upravovat. Díky svojí konstrukci (indexu lomu) svítí po celé své délce, což je žádoucí především v textilním průmyslu.

V některých případech se mohou i tyto vlákna upravovat, docílí se však jen zvýšení jejich světelné intenzity, to je vhodné, např. pro lokální ozařování ve zdravotnictví. Možnosti jsou:

- příměs mikrokystalů přímo do směsi, ze které je vlákno vydlouženo
- mechanické nebo chemické narušení povrchu vlákna
- výroba ze speciálních polymerů, které mají výrazný rozdíl v indexech lomu

Tyto úpravy se nepříznivě projeví na ceně. Další negativní vliv mají mechanické a chemické úpravy, které snižují jejich odolnost v tahu a ohybu v místě poškození. ^[12]

Stranově vyzařující optická vlákna se zprvu začala používat převážně v designu. Průkopníkem byla desingnová francouzská firma Lumigram, která začala vyrábět oblečení a různé bytové doplňky ze stranově vyzařujících optických vláken. ^[16]



Obr. 38 Ukázka výrobků firmy Lumigram[16]

Postupem času se začalo uvažovat o používání stranově vyzařujících vlákench v oblasti aktivní bezpečnosti chodců. V současné době jsou používány pouze pasivní reflexní textilie, které je nutno osvětlit reflektorem, aby byl chodec viděn. Aplikací těchto vláken do různých částí oděvů či výrobků, by tato nutnost odpadla. Jak už bylo zmíněno, tato vlákna mají svůj vlastní zdroj světla



Obr. 39 Prototyp reflexní kabelky od firmy Stap[12]

Na obrázku Obr. 39 je ukázka prototypu kabelky, kde do jejího lemu bylo zabudováno stranově vyzařující optické vlákno. Takto upravená kabelka svítí bez ohledu na to, aby musela být ozářena reflektory aut, jak je nutné při běžných reflexních prvcích.

3 Testování optických vláken

Tato práce se bude zabývat testováním optických vláken pro aktivní bezpečnost, tzn. stranově vyzařující optická vlákna. Tyto vlákna musí splňovat určité požadavky na funkčnost, zpracovatelnost a užitnost, s ohledem na tyto požadavky byly vybrány vhodné vlastnosti k testování.

3.1 Geometrie

Před zahájením samotné aplikace stranově vyzařujících vláken do textilních výrobků je nutné znát základní parametry, jako jsou například tvar průřezu, skutečný průměr těchto vláken atd. Tyto geometrické vlastnosti mohou být zjistit pomocí obrazové analýzy.

3.1.1 Měření geometrických vlastností

Pomocí obrazové analýzy NIS Elemets je možno zkoumat a zpracovávat mikroskopické obrazy vláken a jejich řezy, a to buď příčné, nebo podélné. Na takto pořízených obrázcích lze měřit geometrické vlastnosti vláken, jako jsou například plochy, obvody, průměry atd. Pro vykonání této zkoušky je zapotřebí mít optický mikroskop s binokulární hlavou pro umístění kamery, kameru a PC se softwarem obrazové analýzy NIS Elemets. Vzorky jsou odebírány a připravovány podle norem IN 46-108-01/01 a ČSN 80 0240. Připravené vzorky jsou nasnímány jako reálný obraz, následně jsou v obrazové analýze předzpracovány a transformovány na binární obraz. Díky binárnímu obrazu jsou stanoveny na vzorku například kontury nebo těžiště, a to buď automaticky, nebo interaktivně, ze kterých je možno měřit obrazové funkce, jako je plocha, délka, obvod, těžiště atd. ^[10]



Obr. 40 NIS Elemets[10]

3.1.2 Měření termických vlastností

Je dobré znát předem druh materiálu a přechodové teploty optických vláken. Sice tyto údaje jsou k dostání od výrobce, ale je vhodné je ověřit. Přechodové teploty je možno zjistit pomocí přístroje DSC.

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je metoda, při které lze stanovit přechodové teploty zkoumaného vzorku, a tím identifikovat použitý polymer.

Před zahájením měření je připravena kapsle. V této kapsli jsou nastříhány části příze, nebo u tužších materiálů asi 0,5cm dlouhý vzorek vlákna. Tato kaple je následně vložena do přístroje vedle referenčního (srovnávacího) vzorku. V referenčním vzorku je látka, u které jsou známy její termické vlastnosti a snáší vysoké teploty. Oba vzorky jsou v inertní atmosféře, nejčastěji je používán dusík, a jsou podrobeny lineárnímu ohřevu a rychlosti tepelného toku ve vzorku.

Při metodě DSC je zkoumána tepelná energie potřebná ke kompenzaci rozdílu teplot mezi vzorkem a referenčním vzorkem a je zapisována v závislosti na čase nebo teplotě. Výsledná křivka vykreslí tzv. pík. Díky tomuto píku lze identifikovat termické vlastnosti použitého polymeru jako teplotu skelného přechodu T_g , teplotu tání T_m a teplotu síťování T_n . Při této metodě jsou důležité předem nastavené parametry například rychlost ohřevu. Při nízké rychlosti lze dobře identifikovat polymer, zatímco vysoká rychlost ohřevu identifikuje směsi. ^[10]



Obr. 41 Diferenční skenovací kalorimetrie[10]

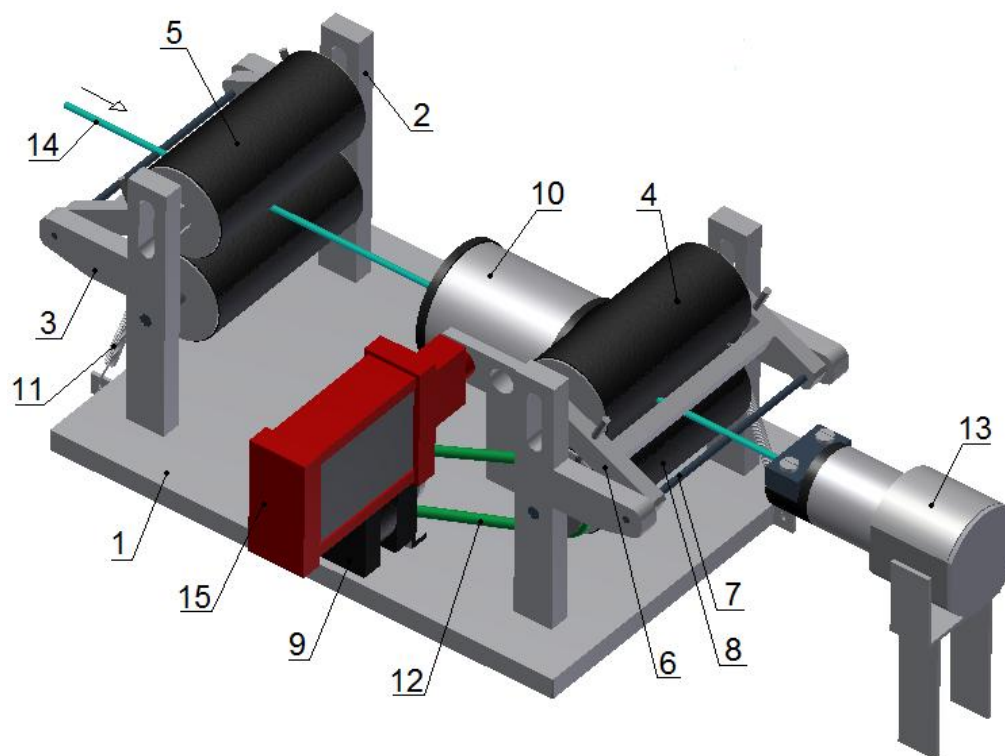
3.2 Optické vlastnosti

Pro bezpečnost chodců je důležité, aby byli vidět pro své okolí. Proto je u optických vláken použitých pro aktivní bezpečnost, hlavním požadavkem svítivost tedy intenzita vyzařování.

Světelnou intenzitu je možno měřit v přímém stavu nebo v ohybu. Ohyb má na intenzitu vyzařování určitý vliv, jak už bylo dříve zmíněno. Při aplikaci do textilních výrobků se eliminaci makroohybům nelze vyvarovat. Zařízení na měření světelné intenzity v ohybu bylo navrženo a popsáno v diplomové práci Barbory Meryové. Ta vznikala v průběhu zpracování této práce, proto zde není zařízení podrobně popsáno. Princip světelné intenzity je popsán v kapitole 2.5.1.

3.2.1 Měření světelné intenzity v napřímeném stavu

Přístroj na měření světelné intenzity je poloautomatický. Optické vlákno je vedeno přes vedoucí válečky a odtahovací válečky do měřicího tunelu. Odtahovací válečky jsou poháněny krokovým motorem. Měření světelné intenzity je prováděno v temném tunelu, ke kterému je umístěn snímač. Krokový motor spolupracuje přes program se snímačem a po každém kroku dojde k naměření hodnoty světelné intenzity na daném místě optického vlákna. Přístroj je znárodněn a popsán na obrázku Obr. 42.



Obr. 42 Zařízení pro měření světelné intenzity[12]

1 – základní deska, 2 – sloupky (4x), 3 – konzole, 4 – odtahové váleček, 5 – válečky k vedení vzorku, 6 – přitlačná páka válečku, 7 – uložení páky, 8 – hnací odtahový váleček, 9 – krokový motor, 10 – měřicí tunel, 11 – tažné pružiny, 12 – hnací řemen, 13 – osvětlovací zařízení, 14 – optické vlákno, 15 – snímač světelné intenzity

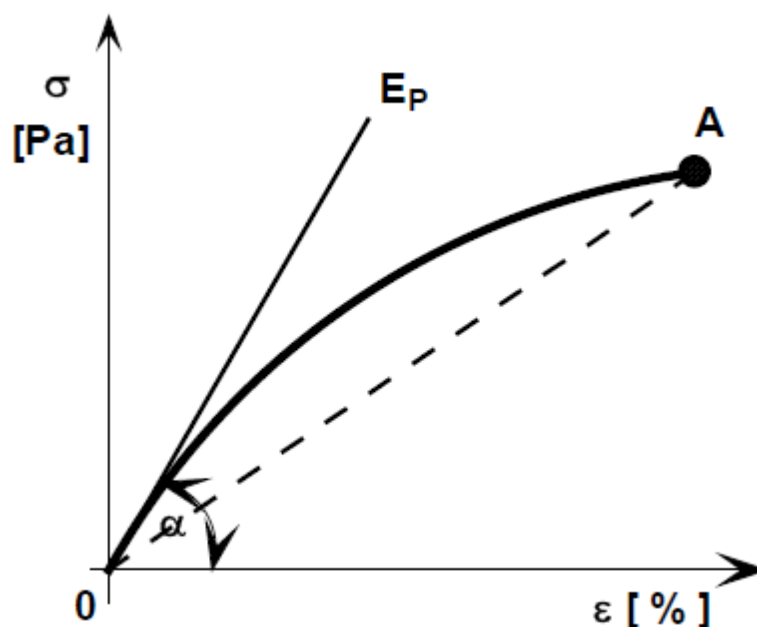
Před začátkem měření je nutno připravit si vzorky vláken, především plochy řezů. Je zapotřebí vlákna oddělovat od cívky ostrým nástrojem a posléze zahradit plochu pomocí série brusných papírů. Nakonec je provedeno leštění pomocí diamantového prášku. Pokud by k takové úpravě plochy nedošlo a plocha by nebyla úplná (vznik odštěpku), vlákno by nepohltilo všechny paprsky ze zdroje.

Měření probíhá následovně, vlákno je připojeno upravenou plochou ke zdroji světla, je navedeno mezi odtahující válečky do měřicího tunelu a mezi vodící válečky. Měření je spouštěno pomocí programu v PC, který je vytvořen v programu Matlab. V programu lze nastavit délku měření a délku kroku motoru. Po skončení měření jsou data uložena jako soubor v Excelu.

3.3 Mechanické vlastnosti

Důležitým požadavkem na stranově vyzařující optická vlákna je jejich odolnost. Tato vlákna musí odolávat poškozením při nošení, údržbě nebo při samotné aplikaci do výrobku. Proto je nutné testovat i mechanické vlastnosti.

Pro popis mechanických vlastností je důležité stanovení odolnosti v tahu (pevnost) a deformační odezvy materiálu (tažnost). Tuhost materiálu lze popsat pomocí počátečního tangentového modulu E_p a spojnicí počátku s koncem tahové křivky (sekantový modul mezi body 0-A).



Obr. 43 Tahová křivka a určení počátečního modulu

Pevnost vyjadřuje odolnost materiálu vůči vnějším silám. Pevnost lze dělit:

- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu
- Pevnost ve stříhu (nebo také pevnost ve smyku)

Mohou být rozlišovány ještě další druhy pevnosti, které nejsou závislé jen na fyzikálních vlastnostech, ale i na jeho profilu:

- Vzpěrná pevnost
- Torzní pevnost
- Pevnost v ohybu

Pevnost je také vyjádřena pomocí meze pevnosti σ_p , jednotkou je Pa (Pascal). Mez pevnosti je maximální hodnota normovaného napětí σ_n , při kterém není porušena celistvost materiálu. Je vypočtena jako podíl deformující síly F a průřezu kolmého řezu S , na který síla působí.

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (9)$$

Tažnost ε je mechanická vlastnost materiálu, která je stanovena zkouškou tahem. Je určena jako poměr délky měřené části zkušební vzorku po přerušení l k původní délce l_0 , vyjádřeno v procentech

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l} \cdot 100 \quad (10)$$

Tažnost čili deformace je v podstatě změna tvaru materiálu. Tvar materiálu je měněn v důsledku působení síly. Tato síla mění vzájemné polohy atomů uvnitř materiálu. V případě, že po odstranění působící síly je materiál vrácen do původního tvaru, jedná se o pružnou (elastickou) deformaci. Pokud, ale materiál není vrácen do původního stavu, jedná o nepružnou (plastickou) deformaci. Každá tato deformace souvisí s jinou částí nadmolekulární strukturou polymeru. ^[9]

Elastická (pružná) deformace souvisí s krystalickou částí polymeru. Tato deformace se řídí Hookovým zákonem.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Kde σ je napětí, ε je protažení a E je modul pružnosti.

Platnost Hookova zákona je pouze do 1% deformace. Elastická deformace je reálnou složkou modulu pružnosti. Při modelování je elastická deformace nahrazena pružinou. ^[9]

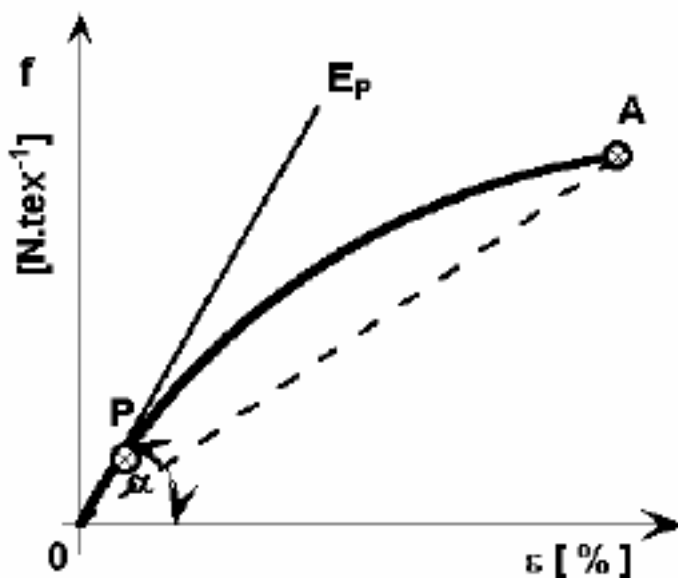
Plastická (nepružná) deformace souvisí s amorfni částí polymeru. Tato deformace se řídí Newtonovým zákonem.

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (12)$$

Kde σ je napětí, η je dynamická viskozita, ε je protažení a t je čas.

Plastická deformace je závislá na čase. Deformace je nevratná a plastická deformace je imaginární složkou modulu pružnosti. Při modelování je plastická deformace nahrazena pístem. ^[9]

Modul pružnosti u délkových textilií nelze definovat, jako Youngův modul pružnosti u strojních materiálů. Vychází z toho, že modul pružnosti je první derivací funkce tahové (pracovní) křivky, jinými slovy tečna ke křivce v počátku (směrnice tečny). Většinou je konstruována graficky, změřen je úhel α a je vypočteno $\tan \alpha$. Z tohoto důvodu je u textilií místo Youngův modul pružnosti používán pojem počáteční tangentový modul E_p . Bod, kde tečna v počátku opouští tahovou křivku, je pak definován jako mez pružnosti, jak ukazuje obrázek Obr. 44. ^[17]



Obr. 44 Tahová (pracovní) křivka[17]

Modul pružnosti lze definovat tangentovým modulem pružnosti

$$E_T = \frac{f_p}{\varepsilon_p} [N \cdot tex^{-1}] \quad (13)$$

kde f je poměrná pevnost a ε je tažnost.

3.3.1 Měření mechanických vlastností

Přístroj na zjištění mechanických vlastností délkových nebo plošných textilií je nazýván Instron. Lze na něm realizovat jednoosé namáhání tlakem, tahem a ohybem. Přístroj využívá dva druhy čelistí a to tkaninové nebo čelisti na vlákna. Vzdálenost mezi horní a dolní čelistí se nazývá upínací délka. Tuto délku lze libovolně nastavit dle potřeby, dále je možno přímo v programu tohoto přístroje nastavit různé další výstupní data či rychlost trhu. Výsledkem je pak tahová křivka vlákna a další výstupní data dle předchozího nastavení. ^[10]

Zkouška je prováděna tak, že zkoumaný vzorek je upevněn do čelistí přístroje. Vzorek musí být napnutý, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Toto zkreslení se také eliminuje nastavením předpětí, které je nastaveno před zahájení zkoušky. Posléze je přístroj uveden do chodu, zastaven je po přerušení vzorku. Z naměřených hodnot je vykreslena tahová křivka, z které je následně určena pevnost, tažnost a počáteční modul.



Obr. 45 Instron[10]

3.3.2 Měření akustického modulu

Akustický modul je možno vypočítat za pomoci přístroje DMT, který měří rychlost zvukového impulsu procházejícího zkoumaným vzorkem v jednotkách $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tuto rychlost procházejícího zvuku ovlivňuje například orientace molekul ve vláknech, která je vyjádřena jako anizotropie vláken. Mohou být měřeny jak samostatná vlákna, tak i proužky tkanin.

Před samotným měřením je nastaveno napětí mezi 8 a 9 V a délka zkoumaného vzorku od 10 až 200 mm. Vzorek je veden mezi dvěma vidlicemi s krystalky pod úhlem 15° , musí ležet přesně ve vidlicích, neboť tento přístroj je velice citlivý. Dále je nastavena vzdálenost, kterou bude procházet zvukový impuls. Tyto vzdálenosti musí být nejméně 3, aby mohla být posléze vytvořena přímka v grafu. Výsledkem je rychlost zvukového impulsu mikrosekundách.

Následně je sestaven graf z naměřených hodnot, kde na ose x jsou mikrosekundy a na ose y vzdálenosti v centimetrech. Pomocí regresní přímky těchto bodů je zjištěna rychlost zvuku c [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]. Rychlost zvuku je rovna směrnici regresní přímky.

Pokud je známa rychlost c , může být zjištěn akustický modul podle vzorce

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [\text{km} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

kde E je Youngův modul pružnosti [Pa] a ρ je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

U optických vláken se silnějším průměrem, je vhodné použít metodu měření pro tkaniny. Místo aby vlákno bylo vedeno mezi vidlicemi, je položeno na podložce a hroty senzorů jsou položeny na vlákno. ^[10]



Obr. 46 Dynamic modulus tester[10]

Dalším důležitým faktorem u zpracování a použití optických vláken je jejich ohebnost (flexibilita) a odolnost v ohybu (ohybová únava materiálu). Je nutné znát před aplikací vlákna do výrobku jak je ohebné, protože makroohybům se nelze vyvarovat. Také je dobré znát počet ohybů vlákna, než je poškozeno. Tato vlastnost je důležitá především pro zpracovatelnost.

Ohebnost čili flexibilita vlákna je závislá na počátečním modulu E a plošném momentu setrvačnosti I .

Pro kruhová vlákna o průměru d platí

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (15)$$

Míra ohebnosti vlákna je vypočtena jako

$$F_e = \frac{1}{(MR)} \quad (16)$$

kde M je ohybový moment a R je poloměr křivosti vlákna. Pro ohyb nosníku obecně platí vztah

$$MR = E \cdot I \quad (17)$$

Potom pro kruhová vlákna o poloměru d je ohebnost dána vzorcem

$$F_e = \frac{64}{E \cdot \pi \cdot d^4} \quad (18)$$

Pak platí, že vlákna s vysokým modulem musí mít dostatečně malý průměr, aby byla ohebnější. ^[13]

Ohybovou únavu materiálu lze stanovit pomocí počtu ohybů do přerušení, ty jsou zjištěny a simulovány díky přístroji na dvojohyb vlákna.

Pro vyhodnocení počtu ohybů do přerušení FC je nutno zvolit vhodné statistické rozdělení dat. Pro správný odhad statistického rozdělení dat FC byl využit tzv. kvantil-kvantilový (Q-Q) graf. Tento graf je založený na porovnání empirické kvantilové funkce $Q(P_i) \approx FC_{(i)}$, s vybranou teoretickou kvantilovou funkcí $QT(P_i)$. Je použit odhad

pravděpodobnosti $P_i=i/(n+1)$ a tzv. pořádková statistika $FC_{(1)} < FC_{(2)} < \dots < FC_{(N)}$ (ukázka uspořádaných hodnot v rostoucím pořadí).^[14]

Bylo zjištěno, že pro vyhodnocení ohybové únavy optických vláken je nejvhodnější použít tří-parametrové Weibullovo rozdělení. Distribuční funkce tohoto rozdělení je vyjádřena rovnicí

$$F(FC) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{FC - A}{B} \right)^C \right] \quad (19)$$

Kde parametr A je nejnižší počet cyklů ohybu do přerušení, parametr B mění měřítko na ose a parametr C ovlivňuje tvar funkce.

Pro rychlý a hrubý odhad těchto parametrů byly využity tzv. momenty. Metoda pro odhad těchto momentů je založena na 3 vybraných vzorcích momentů a odpovídajících teoretických momentů z počtu cyklů ohybů do přerušení. Z těchto momentů byly vytvořeny následně 3 nelineární rovnice. Složitost těchto rovnic je založená na vhodném výběru momentů. Parametr tvaru C lze odhadnout ze vztahu rovnice^[14]

$$C = \frac{\ln(2)}{\ln(m_1 - m_2) - \ln(m_2 - m_4)} \quad (20)$$

pro odhad nejnižšího počtu cyklů A platí rovnice

$$A = \frac{m_1 m_4 - m_2^2}{m_1 + m_4 - 2m_2} \quad (21)$$

a odhad parametru měřítka B je

$$B = \frac{m_1 - A}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{C} \right)} \quad (22)$$

kde $\Gamma(x)$ je Gamma funkce, m_r jsou v těchto vztazích speciální, tzv. Weibullové vzorky momentů definovány vzorcem

$$m_r = \sum_{i=0}^{N-1} \left(1 - \frac{i}{N}\right)^r [FC_{(i+1)} - FC_{(i)}] \quad (23)$$

pro $i=0$ platí $FC_{(0)}=0$.

Tato velmi jednoduchá metoda může být použita pro hrubé odhadnutí A v tří-parametrovém Weibullově modelu. Pak Q-Q graf může být jednoduše konstruován pro tří-parametrové Weibullovo rozdělení. Potom nastane v Q-Q grafu uspořádání lineární závislosti $y=ax+b$ kde platí^[14]

$$\begin{aligned} y &= \ln[-\ln(1 - p_i)] \\ x &= \ln(FC_{(i)} - A) \\ a &= C \\ b &= -\ln(B)C \end{aligned} \quad (24)$$

V tomto případě je nutné znát odhad nejnižšího počtu ohybů do přerušení A vypočítaný z rovnice (21).

Střední hodnota $E(FC)$ a k ní odpovídající směrodatná odchylka $SD(FC)$ jsou vypočteny z rovnic:

$$E(FC) = A + B\Gamma\left(1 + \frac{1}{C}\right) \quad (25)$$

$$SD(FC) = E(FC) \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{C}\right)} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

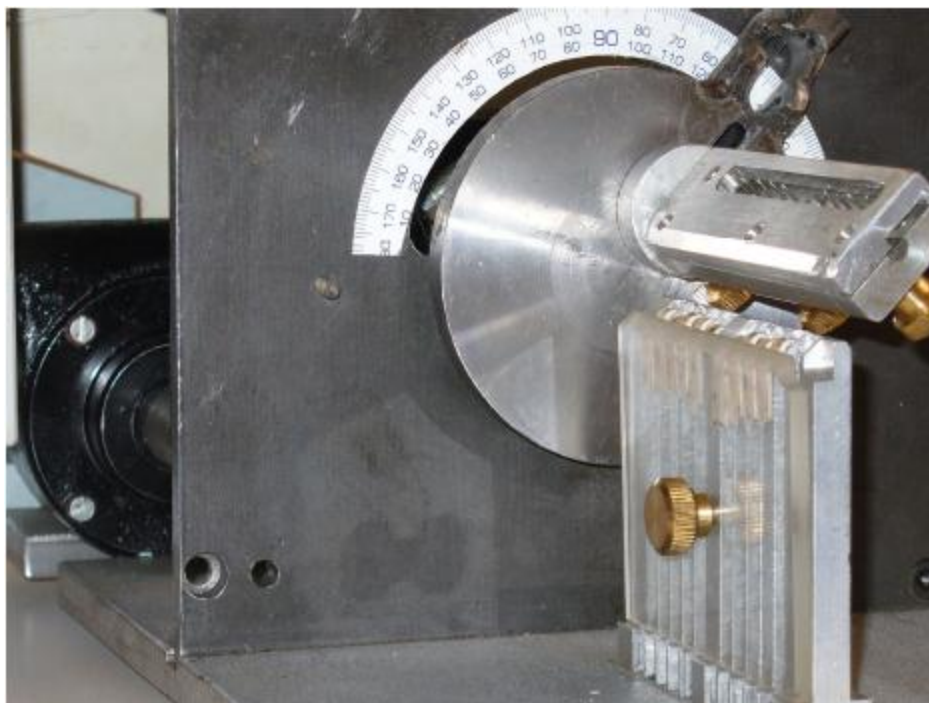
kde $\Gamma(.)$ je Gamma funkce.^[14]

3.3.3 Měření ohybové únavy materiálu

Na testování ohebnosti bylo vyvinuto zařízení na dvojohyb vlákna, viz práce *Flex Fatigue of Polymeric Optical Fibers*^[14]. Přístroj určuje počet dvojohybů, které vlákno vydrží do jeho porušení. Skládá se z horní výkyvné čelisti, vodících lišt, které vymezují prostor pro ohyb vlákna a dírami v základní desce, z kterých volně visí konec vlákna s předpětím.

Na přístroji lze nastavit úhel dvojohybu v mezích 0-180°, výšku zdvihu umístění horní čelisti od středu otáčení v mezích 8-27mm, i frekvenci ohybů. Na výkyvné čelisti jsou vyfrézované vodící drážky pro různé průměry vzorků od 0,2-3mm.

Vzorek je upevněn v horní výkyvné čelisti. Vede přes vyfrézované vodící drážky, mezi vodící lišty až do otvoru v základní desce a na jeho konec je upevněno předpětí.



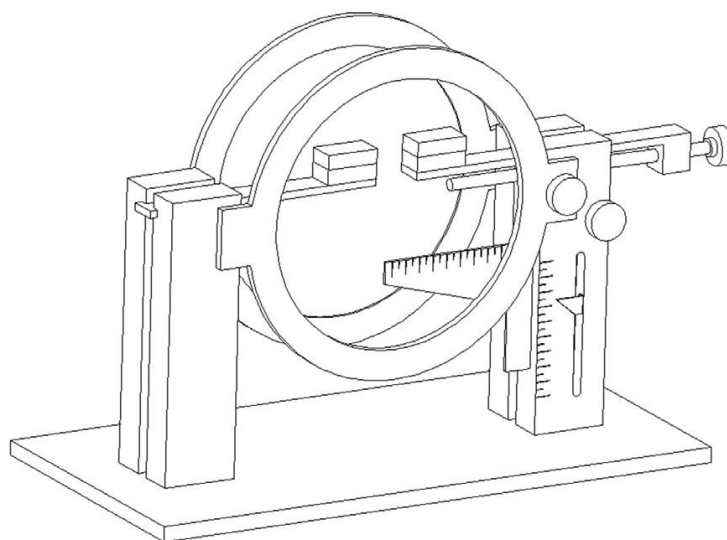
Obr. 47 Přístroj na dvojohyb[14]

3.3.4 Měření tuhosti v ohybu

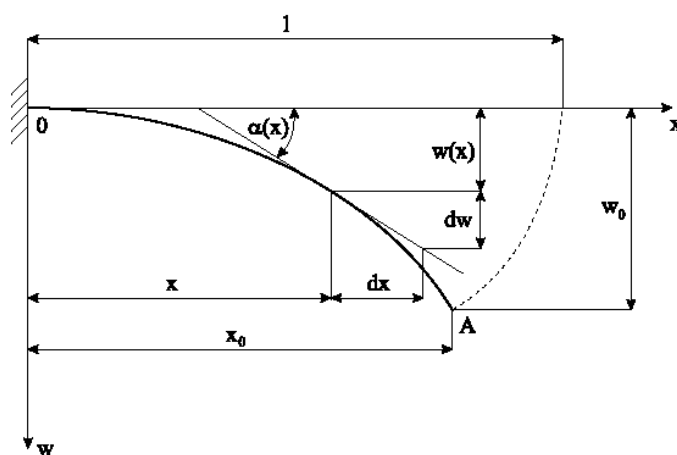
Tuhost v ohybu je odolnost textilie nebo vlákna vůči ohýbání, vlastní vahou i působením vnější síly. Pro zjištění tuhosti v ohybu EI [Nm^2] je použita norma IN 22-201-01/01 Ohybová tuhost příze.

K výpočtu ohybové tuhosti je nutné stanovit měrnou tíhu q [Nm^{-1}], její délku l [m] a z tvaru průběhové čáry viz obrázky Obr. 49 těžiště ohybové křivky x_c a polohu konce A ohybové křivky (souřadnice x_0, w_0). Ke zkoušce je zapotřebí systém obrazové analýzy LUCIA G, přípravek, ve kterém je textilie na jednom konci vetknuta a na druhém volná viz obrázky Obr. 48 a PC se softwarem provádějící výpočet ohybové tuhosti. Pro provedení zkoušky je nutno nejprve nastavit a uložit kameru pro snímání, doporučováno je 70ms. Následně je vzorek upnut do čelistí přípravku s určitou upínací

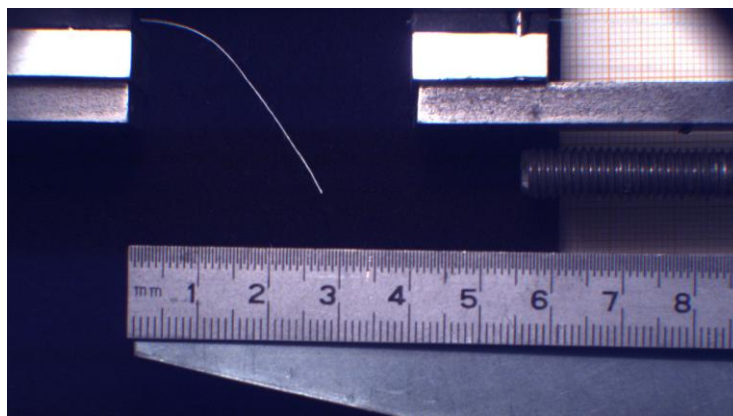
délkou a vzorek se nasnímá. Nasnímaný vzorek je digitalizován a ohybová čára je uložena viz obrázek Obr. 50. Potom za pomoci programu Matlab se vypočítají potřebné parametry a z nich ohybová tuhost příze EI .



Obr. 48 Přípravek pro stanovení ohybové tuhosti příze[11]



Obr. 49 Znázornění průhybové čáry příze[11]



Obr. 50 Zobrazení snímku snímaného pomocí software LUCIA[11]

Tato metoda je pro testování optických vláken nevhodná. Důvod byl ten, že vlákna, která byla namotána na cívce, částečně držela tvar této cívky. Proto by byly výsledky zkreslené. Možnost tohoto testování by byla za předpokladu, že by vlákna držela přímý tvar a ohyb byl vytvořen gravitací a ne ohybem cívky.

3.4 Tepelné vlastnosti

Na výrobky pro aktivní bezpečnost jsou použity polymerní optická vlákna, tedy vlákna z plastů (polymerů). Každý plast má jiné podmínky, při kterých může být použit. Jelikož jsou stranově vyzařující vlákna použita v textilních výrobcích, předpokládá se, že budou čištěny, proto je nutné znát teploty, při kterých se vlákno nijak nepoškodí nebo nesrazí.

Termodynamika plastů

Vlastnosti polymerů jsou závislé především na teplotě. V určité oblasti teplot probíhají tyto změny rychleji anebo se mění skokově. Tyto oblasti se nazývají přechodové a v těchto oblastech existují přechodové teploty. Teplota zesklenní T_g , teplota viskózního toku T_f (amorfní plasty) a teplota tání T_m (semikrystalické plasty).

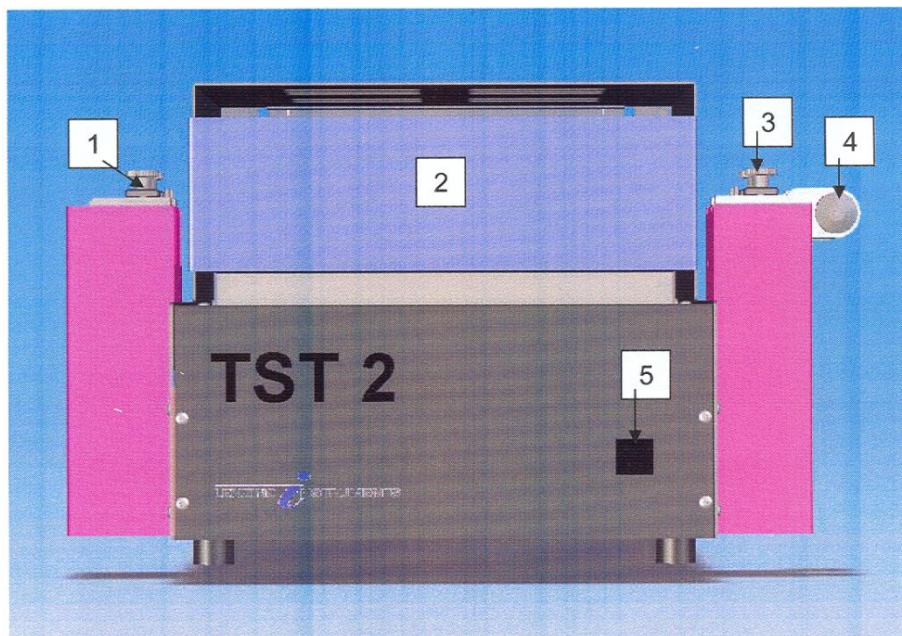
U amorfních plastů se hodnoty pevnosti v tahu a modul pružnosti v přechodové oblasti v okolí teploty zesklenní T_g mění skokově. Hodnoty jsou závislé na velikosti mezimolekulárních sil, čím budou síly větší, tím bude vyšší i teplota zesklenní T_g . Závisí také na ohebnosti řetězců, čím bude ohebnější a mezimolekulární síly menší, tím bude nižší teplota zesklenní T_g .

Při teplotě viskózního toku T_f narůstá intenzita změn vlastností polymeru. Při teplotě viskózního toku T_f ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti materiálu. Zvýšením teploty, klesají mezimolekulární síly a tím se snižuje i viskozita taveniny. Při dalším zvyšování teploty nastane tepelná degradace T_z . Zesíťované amorfnní polymery se ve srovnání s lineárními chovají odlišně. Tuhá síť chemických vazeb vylučuje přesuny makromolekul jako celku a proto lze u těchto materiálů nalézt při vysokých teplotách jen určitou kaučukovitou oblast s relativně vysokým modulem pružnosti, jehož hodnota pak zůstává konstantní až do teploty rozkladu.

U semikrystalických polymerů dochází ke změnám vlastností nejrychleji, tyto změny charakterizuje teplota tání T_m . Při teplotě tání T_m dochází k rozpadu a tání krystalitů. Tento rozpad je provázen změnou fáze hmoty, která přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Hodnota T_m závisí na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti makromolekul. Protože i semikrystalické polymery obsahují určité množství amorfnních podílů, takže lze i u nich stanovit teplotu zesíťování T_g .^[7]

3.4.1 Měření tepelné sráživosti a srážecí síly

Pomocí přístroje TST 2 je možno určit tepelní sráživost nebo srážecí sílu vlákna, pásku nebo příze v závislosti na čase. Přístroj má dva páry čelistí po levé a pravé straně jak je vidět na obrázku Obr. 51.



Obr. 51 Přístroj Shrinkage TST2

pohled zepředu přístroje 1,3 – čelisti pro uchycení materiálu se zabudovanými senzory pro měření napětí, 2 – výhřevná komora, 4 – rotační senzor pro měření sráživosti, 5 – tlačítko „start“

Při *stanovení tepelné sráživosti* jsou vlákna pevně uchyceny v levé čelisti. Čelisti na pravé straně jsou otevřeny a vlákno je vedeno přes rotační senzor a na konec vlákna je umístěno předpětí. Vláknem je poté vsunuto do tepelné komory. Teplota komory může být nastavena v rozsahu 45°C až 300°C. Tepelná sráživost vlákna je stanovena z délky oblouku, o který se během zahřátí otočí mechanismus rotačního senzoru. Sráživost je poté stanovena jako procento změny délky ku délce původní.

Tepelná sráživost se dá rozdělit na tři úseky:

- *Maximální tepelná sráživost:*

Maximální hodnota relativního zkrácení (sražení) délky délkového textilního útvaru odečtená ze začátku zkoušky při konstantním napětí. Konstantní napětí je zajištěno pomocí předpětíových závaží.

- *Efektivní tepelná sráživost:*

Relativní zkrácení (sražení) délky délkového vlákenného útvaru vlivem působení definované teploty a délky jejího působení za konstantního napětí délkového vlákenného útvaru. Doporučená doba měření efektivní tepelné sráživosti je 1 minuta.

- *Zbytková tepelná sráživost:*

Relativní zkrácení (sražení) délky délkového vlákenného útvaru po ukončení působení definované teploty na délkový textilní útvar za konstantního napětí. Doporučená doba měření zbytkové tepelné sráživosti je 0,5 minuty.

Pomocí tepelné sráživosti je možno získat *maximální srážecí rychlost*. Tato rychlost je definována jako maximální hodnota derivace kinetické křivky srážení.

Díky této rychlosti se dá stanovit *citlivost maximální rychlosti* srážení na teplotě. A to za předpokladu lineární závislosti maximální rychlosti tepelného srážení v_s [%min⁻¹] na teplotě T [°C] v oblasti od teploty skelného přechodu do teploty tání je definována jako směrnice regresní přímky A [%min⁻¹°C⁻¹]

$$v_s = AT + B \quad (27)$$

kde B je úsek regresní přímky v [%min⁻¹].

Tepelná srážecí síla je měřena obdobným způsobem jako sráživost. Rozdíl je, že pravé čelisti jsou uzavřeny. Takže vlákno je uchyceno v levé i v pravé čelisti a na jeho konci je opět umístěno předpětí. Po vsunutí vlákna do tepelné komory, je určena změna napětí v čase při konstantní délce.

4 Experimentální část

V této části budou rozebrány vybrané vlastnosti optických vláken pro aktivně bezpečnostní prvky. Vlastnosti byly zvoleny s ohledem na zpracovatelnost a funkci. Při měření byl použit ve všech případech stejný typ optického vlákna o různých průměrech. V tabulkách jsou parametry zkoumaných vláken.

Tab. 4 Přehled zkoumaných vzorků

Typ optického vlákna	Grace	Grace	Grace	Grace	Grace
Průměr [mm]	0,25	0,40	0,50	0,75	1,00

Tab. 5 Vlastnosti výrobce

Vlastnosti	Vlákno
Materiál jádra	PMMA
Materiál obalu	Polykarbonát
Index lomu jádra	1,49
Index lomu obalu	1,41
Numerická apertura	0,48
Maximální vstupní uhel	57,4
Hustota	1190 kg m ⁻³
Síla v tahu	78MPa
Délka vazby	400 – 900 nm
Teplota použití	20 – 70 °C

4.1 Mechanické vlastnosti

Nejdříve byla optická vlákna podrobena namáháním v tahu pomocí přístroje Instron. Tento přístroj byl popsán v předchozí kapitole 3.3.1.

Před zahájení měření byly nasazeny tkaninové čelisti s hlavou 5000N. I když jsou měřena vlákna, nebyly použity čelisti na vlákna z důvodu, že optická vlákna v těchto čelistech prokluzovala. Dále aby se zamezilo prasknutí a prokluzování optických vláken, byly konce vláken obaleny gumou.

V samotném programu přístroje byly nastaveny parametry dle norem pro správný průběh zkoušky. V tabulce jsou uvedeny všechny nastavené parametry.

Tab. 6 Parametry pro Instron

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [mm]	0,25	0,40	0,50	0,75	1,00
Plocha [mm ²]	0,0491	0,1257	0,1963	0,4418	0,7854

Rychlost [mm·min ⁻¹]	100	100	100	100	100
Upínací délka [mm]	200	200	200	200	200
Předpětí [N]	0,267	0,630	1,278	2,738	3,385
Počet měření [-]	50	50	50	50	50

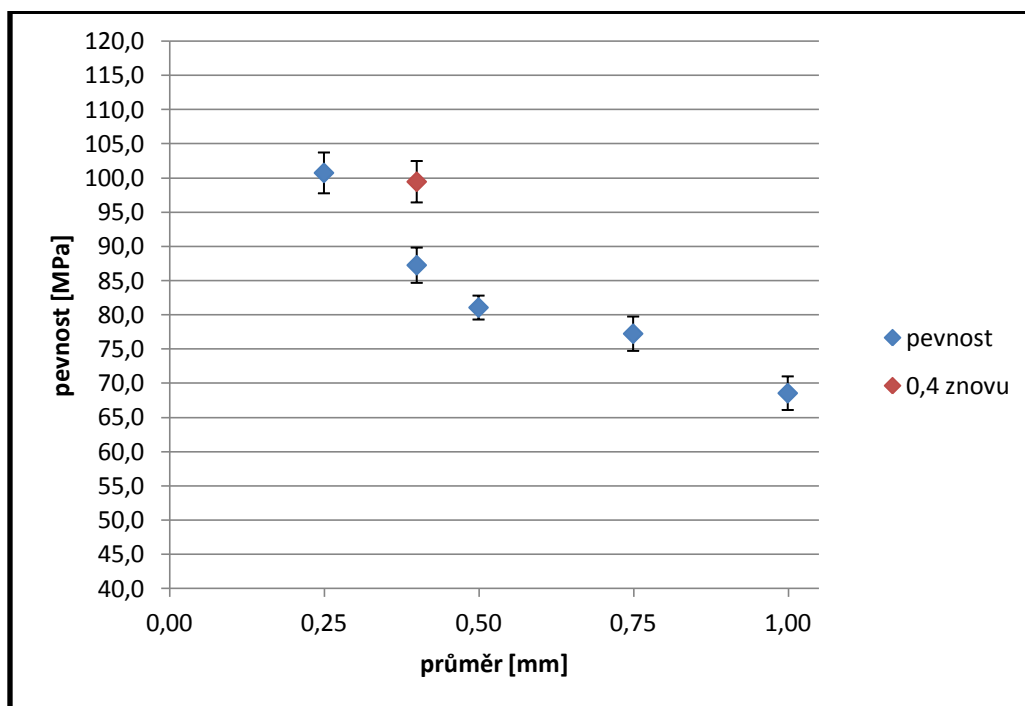
Předpětí bylo vypočteno jako jemnost vláken v *tex* krát 5.

Naměřená data byla importována do tabulkového procesoru, zde byla uspořádána a následně statisticky vyhodnocena pomocí statistického programu Qcexpert.

Pevnost

Tab. 7 Vyhodnocená data pro pevnost

Vzorek	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [MPa]	100,71	87,22	81,03	77,21	68,52
Spodní mez 5% [MPa]	97,73	84,64	79,28	74,7	66,06
Horní mez 95% [MPa]	103,69	89,8	82,78	79,72	70,97
Rozptyl	110,07	82,39	36,21	77,97	74,59
Směr. Odchylka	10,49	9,08	6,02	8,83	8,64

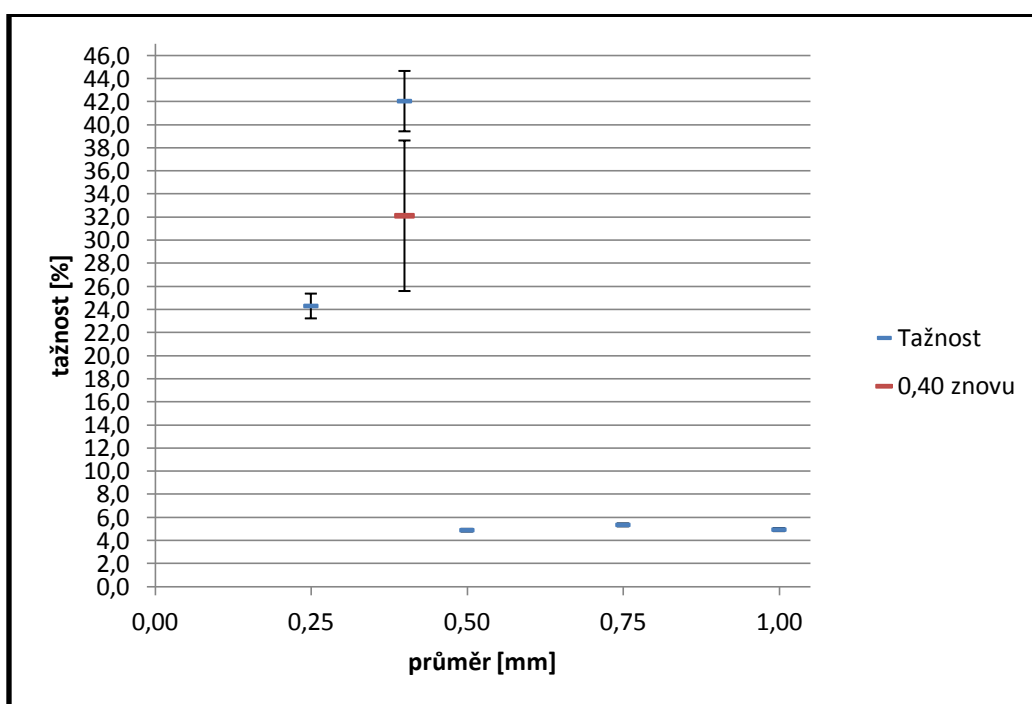


Obr. 52 Vliv průměru na pevnost vlákna

Tažnost

Tab. 8 Vyhodnocená data pro tažnost

Vzorek	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [%]	24,31	42,05	4,9	5,36	4,95
Spodní mez 5% [%]	23,24	39,43	4,78	5,23	4,82
Horní mez 95% [%]	25,38	44,66	5,01	5,48	5,08
Rozptyl	13,95	70,38	0,16	0,17	0,2
Směr. Odchylka	3,73	8,39	0,4	0,42	0,45

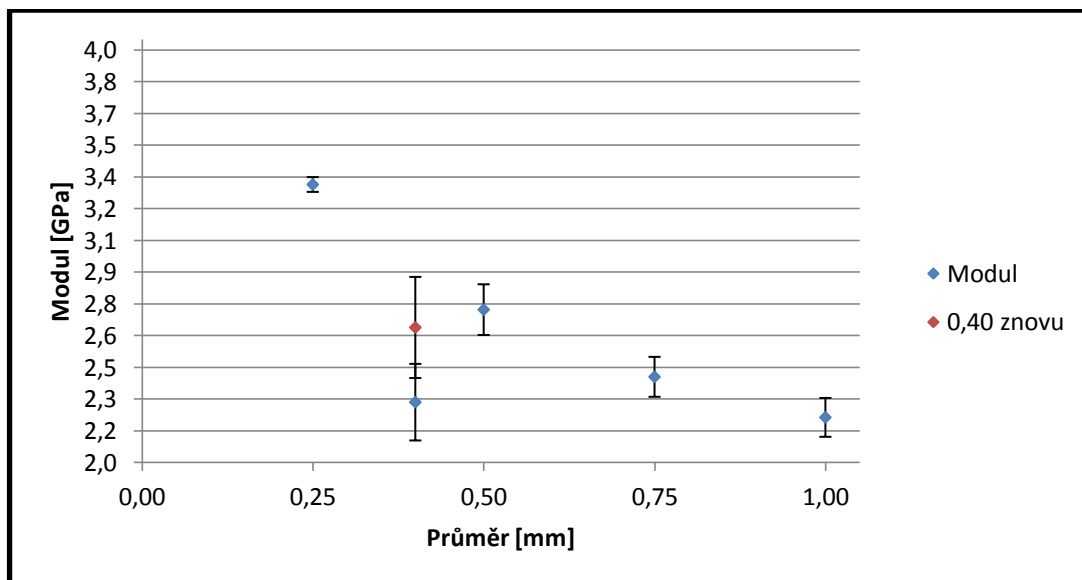


Obr. 53 Vliv průměru na tažnost vlákna

Počáteční modul

Tab. 9 Vyhodnocená data pro počáteční modul

Vzorek	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [GPa]	3,32	2,29	2,72	2,41	2,21
Spodní mez 5% [GPa]	3,28	2,11	2,6	2,31	2,12
Horní mez 95% [GPa]	3,35	2,47	2,84	2,5	2,31
Rozptyl	0,02	0,41	0,18	0,11	0,1
Směr. Odchylka	0,12	0,64	0,42	0,33	0,32



Obr. 54 Vliv průměru na počáteční modul

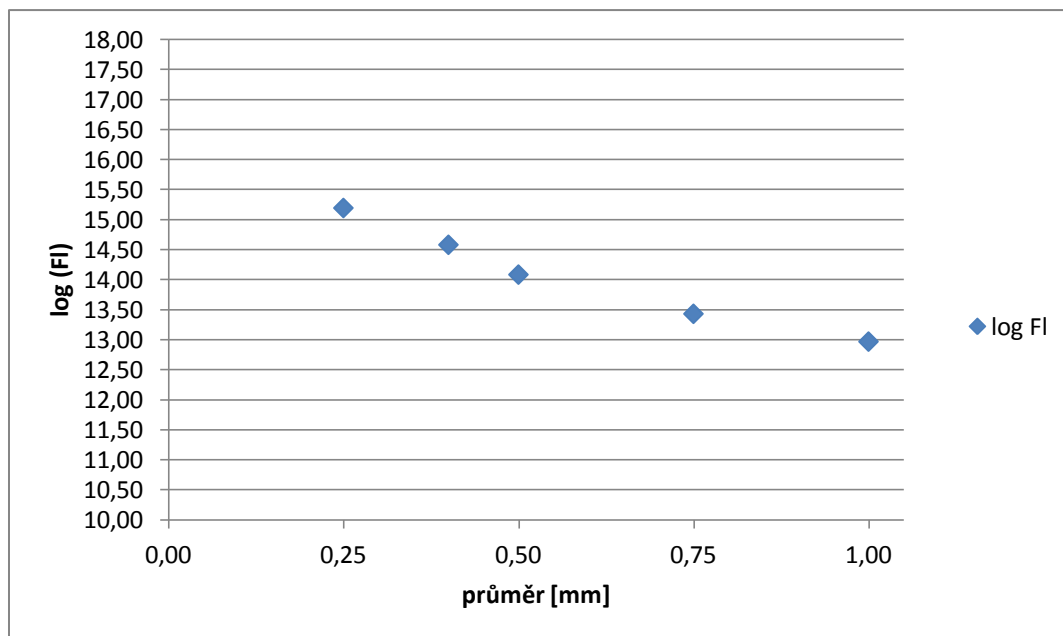
Diskuze

Z dat je patrné, že průměr vlákna má poměrně velký vliv na mechanické vlastnosti. Při měření byla zjištěna anomálie u vláken o průměru 0,40mm. Tato vlákna byla znovu přeměřena a anomálie byla potvrzena. Pro další potvrzení byly data porovnány s výsledky jiného měření, kde také hodnoty vlákna o průměru 0,40mm vybočovaly. Z toho lze usoudit, že při výrobě těchto vláken byly použity jiné podmínky než u ostatních.

Z předchozího měření je stanoven počáteční modul E [GPa]. Díky tomuto modulu a průměru vlákna d [m] je možno definovat ohebnost – flexibilitu F_l , tak je vypočtena pomocí rovnice (18). Pro lepší interpretaci byly výsledky zlogaritmovány.

Tab. 10 Vyhodnocená data pro flexibilitu

Vzorek	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr	$1,58 \cdot 10^{+15}$	$3,84 \cdot 10^{+14}$	$1,23 \cdot 10^{+14}$	$2,73 \cdot 10^{+13}$	$9,39 \cdot 10^{+12}$
Spodní mez 5%	$1,56 \cdot 10^{+15}$	$3,45 \cdot 10^{+14}$	$1,17 \cdot 10^{+14}$	$2,62 \cdot 10^{+13}$	$9,01 \cdot 10^{+12}$
Horní mez 95%	$1,59 \cdot 10^{+15}$	$4,23 \cdot 10^{+14}$	$1,28 \cdot 10^{+14}$	$2,83 \cdot 10^{+13}$	$9,77 \cdot 10^{+12}$
Rozptyl	$3,45 \cdot 10^{+27}$	$1,87 \cdot 10^{+28}$	$3,68 \cdot 10^{+26}$	$1,45 \cdot 10^{+25}$	$1,82 \cdot 10^{+24}$
Směr. Odchylka	$5,88 \cdot 10^{+13}$	$1,37 \cdot 10^{+14}$	$1,92 \cdot 10^{+13}$	$3,80 \cdot 10^{+12}$	$1,35 \cdot 10^{+12}$
Logaritmus průměr	15,20	14,58	14,09	13,44	12,97



Obr. 55 Vliv průměru na Flexibilitu vlákna

Z obrázku je vidět, že vlákna s menším průměrem jsou více ohebná, oproti vláknům s větším průměrem.

Dalším krokem bylo namáhání optických vláken v ohybu. Ohyb vlákna nám simuluje přístroj na dvojohyb, který byl popsán v kapitole 3.3.3.

Před samotným měřením bylo nutno přístroj nastavit. Byla nastavena frekvence ohybů 100 Hz, což odpovídá asi 116,7 dvojohybů za minutu a úhel ohýbání od 20°-160° na stupnici přístroje. Na výkyvné čelisti byly kouskem kartonu vyplněny různě vyfrézované vodící drážky, zkreslovali výsledky. Po upevnění vzorků bylo na jejich volný konec upevněno předpětí.

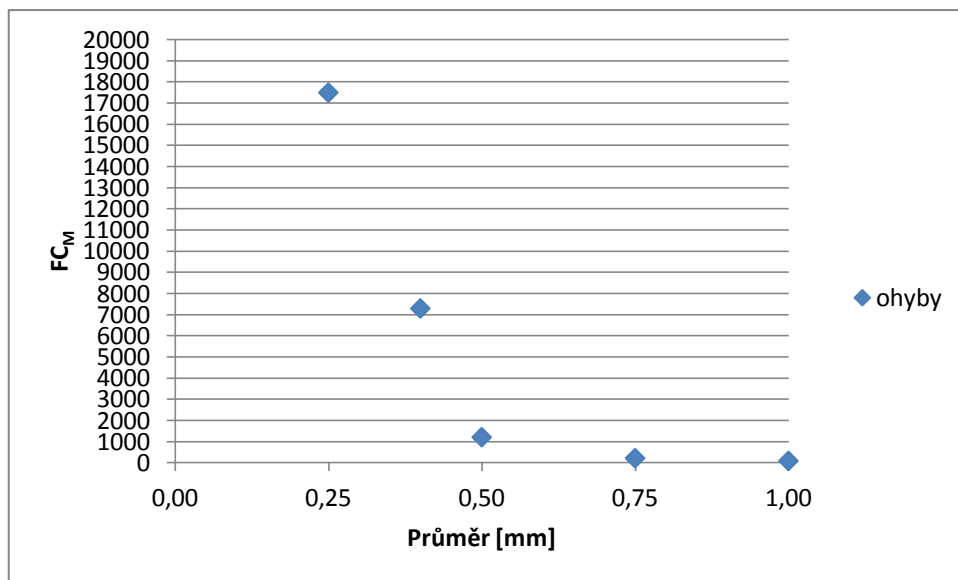
Tab. 11 Parametry pro Dvojohyb

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [mm]	0,25	0,40	0,50	0,75	1,00
Frekvence [Hz]	100	100	100	100	100
Předpětí [N]	5	5	5	5	5
Počet měření [-]	100	100	100	100	100

Po ukončení měření byl stanoven průměr počtu ohybů do přerušení FC_M s odpovídající směrodatnou odchylkou S_{FC} a variační koeficient CV_{FC} , které charakterizují ohybovou únavu materiálu.

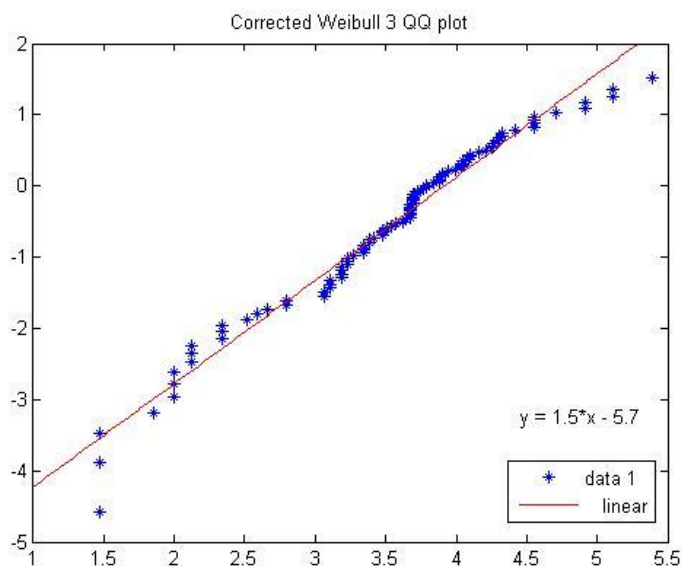
Tab. 12 Charakteristiky pro ohybovou únavu

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
FC_M [cyklus]	17499,66	7296,03	1208,52	217,24	88,27
S_{FC} [cyklus]	7361,42	2969,42	1011,19	163,48	37,66
CV_{FC} [%]	42,07	40,70	83,67	75,25	42,67



Obr. 56 Vliv průměru na počet ohybů

Aby se dokázalo, že počet ohybů do přerušení lze popsat pomocí tříparametrového Weibullova rozdělení, je nutné zkonstruovat Q-Q graf. Leží-li data přibližně v přímce, je užití rozdělení správné.



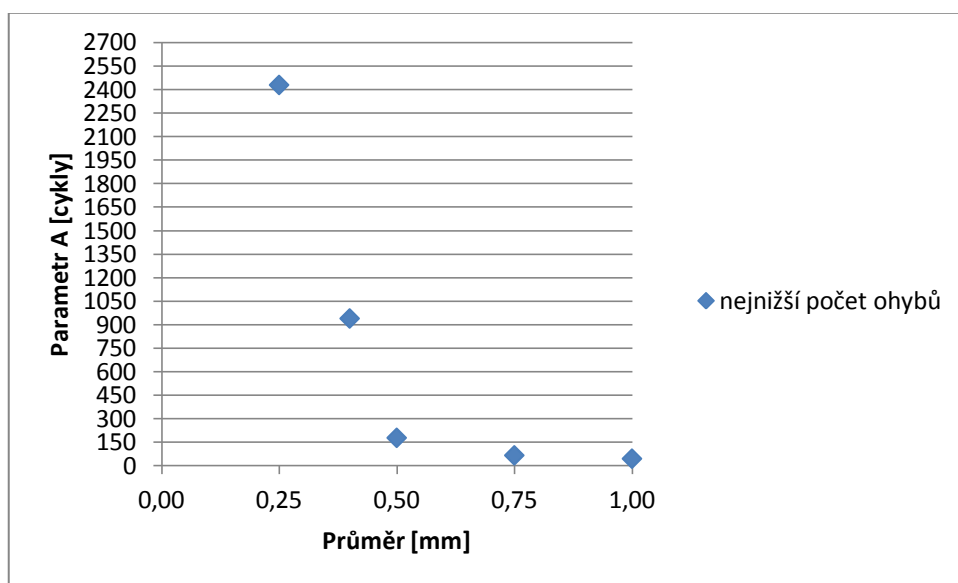
Obr. 57 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 1,00mm

Z obrázku Obr. 57 je patrné, že užití tří-parametrového Weibullova rozdělení lze použít. Přibližné uspořádání dat do přímky se projevilo i u dalších zkoumaných vláken různých průměrů. Zbylé grafy jsou k náhledu v příloze 1.

Pomocí rovnic (20)-(22) byly vypočteny hrubé odhady parametrů Weibullova rozdělení. Parametr A ve Weibullově rozdělení vyjadřuje nejmenší počet ohybů do přerušení vlákna. Z obrázku Obr. 58 je zřejmé, že vlákna většího průměru prasknou při namáhání v ohybu mnohem rychleji než vlákna tenčí

Tab. 13 Parametry Weibullova rozdělení

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
A [cykly]	2428,6	938,3	176,8	64,8	43,6
B [cykly]	17015,5	7178,0	1024,3	145,3	48,3
C [-]	2,2	2,2	1,0	0,9	1,3

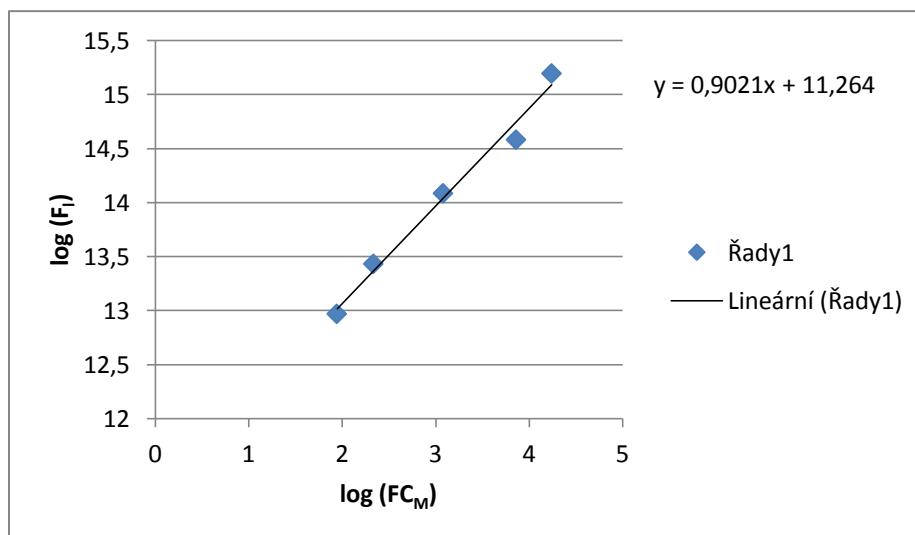


Obr. 58 Vliv průměru na nejnižší počet ohybů

Diskuze

Měření ukázalo, že průměr vlákna má vliv na ohebnost, i na ohybovou únavu. Proto by se vlákna většího průměru, měli aplikovat do výrobku pokud možno v napřímeném stavu, aby nedocházelo k prasknutí a ztrátám světelné intenzity. Tenká vlákna, která mají větší ohebnost a vydrží více cyklů ohybu, mohou být i zatkány či zapleteny do textilií.

Také byla dokázána korelace mezi ohebností – flexibilitou a počtem ohybů do přerušení. Tuto závislost je možno vidět na obrázku Obr. 59.



Obr. 59 Závislost Flexibility na počtu ohybů

4.2 Optické vlastnosti

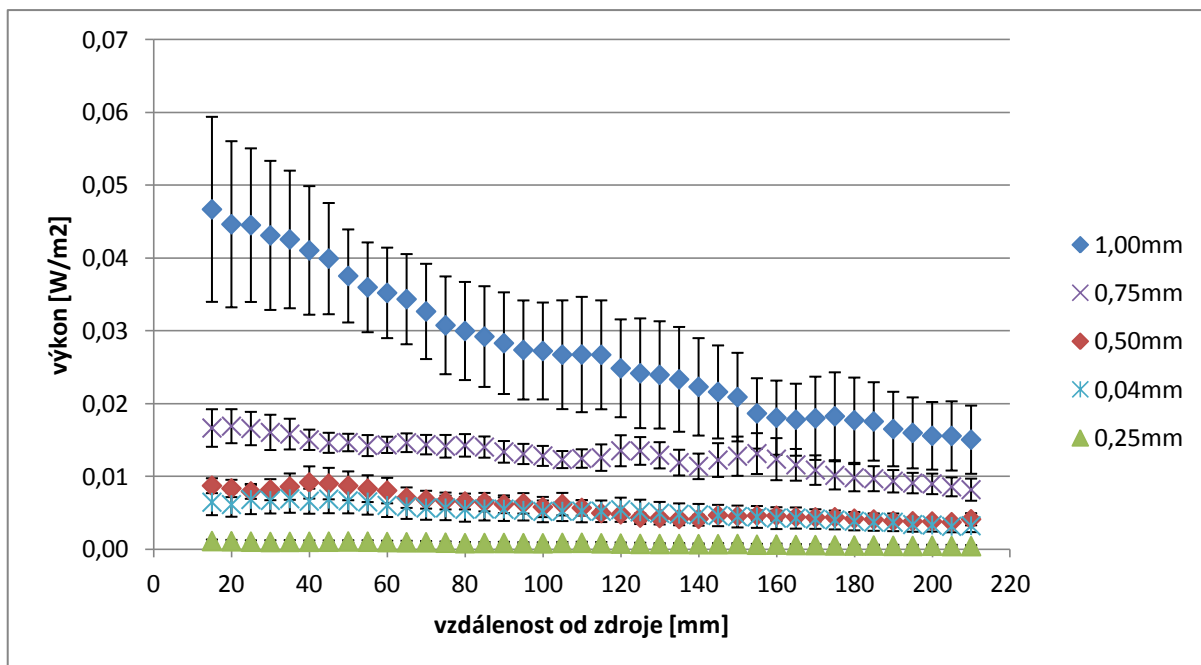
Mezi základní parametry, které charakterizují funkci optických vláken je útlum vysílaného signálu a šířka pásma.

Pro určení světelného útlumu je zapotřebí znát hodnoty světelné intenzity. Přístroj a princip měření byl již popsán v kapitole 3.2.1. Před samotným měřením je nutno nastavit v programu přístroje velikost kroku a délku měřeného úseku.

Tab. 14 Parametry pro přístroj na dvojohyb

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [mm]	0,25	0,40	0,50	0,75	1,00
Velikost kroku [mm]	5	5	5	5	5
Délka měření [mm]	200	200	200	200	200
Délka vlákna [mm]	600	600	600	600	600

Naměřené hodnoty z přístroje jsou rovny výkonu vyzařování vlákna na plochu snímače v temném tunelu.



Diskuze

Na obrázku je vidět, že intenzita vyzařování se vzdáleností od zdroje klesá. Při aplikaci optických vláken do textilního výrobku, je tento efekt nežádoucí. Je zapotřebí, aby vlákno svítilo po celé své délce.

Tento jev lze eliminovat, pokud je zdroj světla (dioda) umístěn na oba konce vlákna. Další způsob je nanesení reflexní vrstvy patent (PV 302903) TU v Liberci. Částečně lze tomuto jevu také zamezit použitím velmi krátkých vláken.

Pro lepší interpretaci světelné intenzity byly křivky v grafu experimentálně vyhlazeny. Ze základního vztahu světelného útlumu z kapitoly 2.5.1 byla rovnice (4) zlogaritmována

$$\log P(z) = \frac{-\alpha \cdot z}{10} + \log P_v(0) \quad (39)$$

Kde $P_v(0)$ je intenzita vyzařování na vstupu do vlákna pro $z=0$.

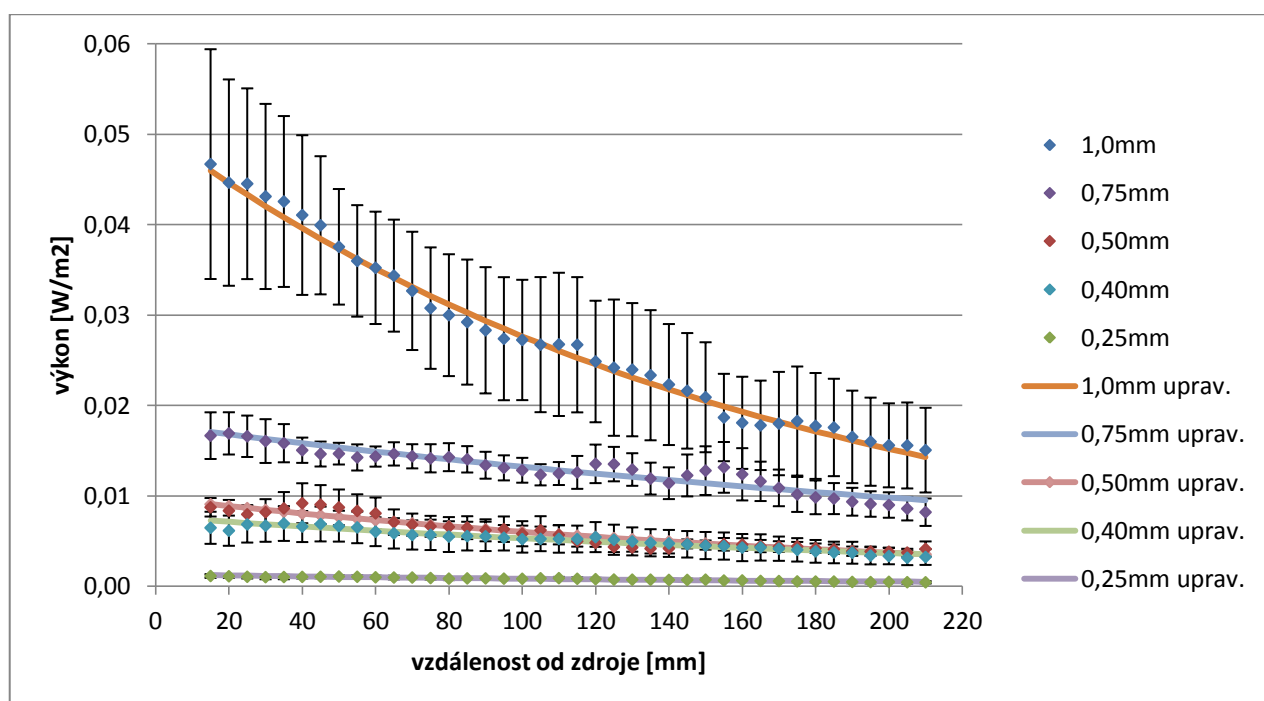
Posléze na základě lineární regrese byly nalezeny parametry exponenciálních funkcí intenzity vyzařování optických vláken. Pomocí směrnice regresní přímky k a úseku q byly vypočteny parametry intenzity vyzařování na vstupu do vlákna $P_v(0)$ a koeficient útlumu α za pomoci vztahu

$$\alpha = -10k, \quad P_v(0) = 10^q \quad (40)$$

Intenzita vyzařování na vstupu do vlákna $P_v(0)$ charakterizuje kvalitu osvětlovacího systému, tj. jak se podařilo navést světlo do vlákna. Koeficient útlumu α je charakteristikou kvality vyzařování vlákna.

Tab. 15 Parametry intenzity vyzařování

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
$P_v(0)$ - parametr kvality	0,0013	0,0077	0,0098	0,0178	0,0503
α - koeficient útlumu	0,0200	0,0160	0,0210	0,0130	0,0260



Diskuze

Předchozím měřením bylo zjištěno, že průměr vlákna má převážně negativní vliv na mechanické vlastnosti. Ovšem při zkoumání intenzity vyzařování byl zjištěn opak, a to že průměr vlákna má na intenzitu vyzařování spíše pozitivní vliv.

Důvodem větší intenzity vyzařování vláken s větším průměrem je ten, že jejich plocha příčného řezu je velká a pojme více světelných signálů (vidů), než u tenkých vláken. Dalším důvodem je také to, že díky velkému průměru mají větší plochu na vyzařování.

Intenzitu vyzařování také ovlivňuje parametr kvality navedení světla do vlákna $P_v(0)$. Ten se zvyšuje v závislosti na kvalitě vyhlazení plochy příčných řezů vlákna. Čím je plocha hladší a rovnější, tím navede do svého jádra víc světelného signálu.

4.3 Tepelné vlastnosti

Důležitým parametrem ve zpracovatelských a užitných vlastnostech optických vláken a výrobcích z nich je tepelná sráživost a maximální srážecí síla, z které lze následně stanovit citlivost na tepelné vlivy.

Pro stanovení tepelné sráživosti byl použit přístroj TST 2, jeho popis a princip měření je popsán v kapitole 3.4.1. Před zahájením měření byly stanoveny teploty 40°C, 50°C, 70°C, 100°C, 125°C, 150°C, při kterých bude probíhat měření. Následně bylo nutné stanovit předpětí, to nemohlo být stanoveno dle norem přístroje, protože bylo příliš malé a vlákna se při vsunutí do tepelné komory shrnovala. Proto bylo předpětí u jednotlivých průměrů stanoveno experimentálně.

Tab. 16 Parametry pro TST2

Parametry	Grace 0,25	Grace 0,40	Grace 0,50	Grace 0,75	Grace 1,00
Průměr [mm]	0,25	0,40	0,50	0,75	1,00
Předpětí [N]	2	4	11,5	-	-

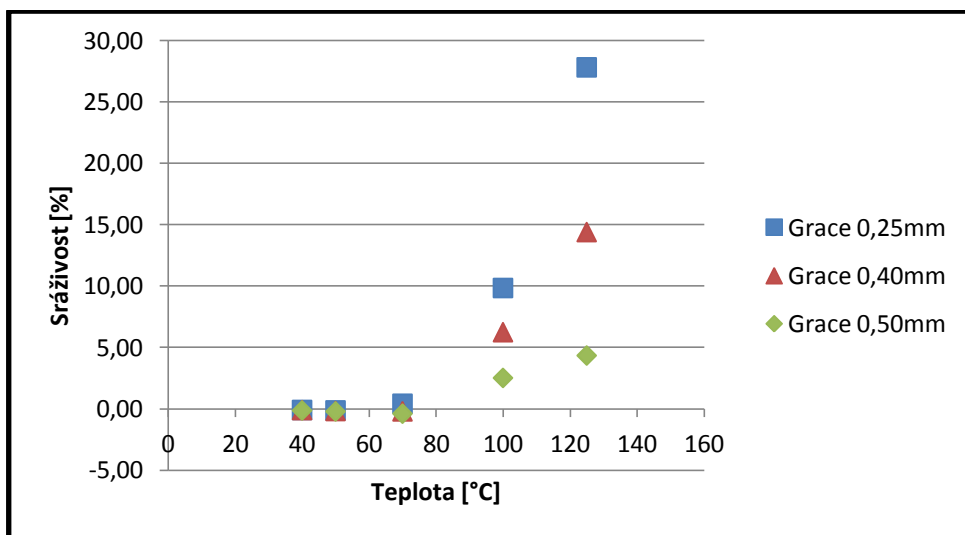
Z tabulky je zřejmé, že tato zkouška nešla povést u vláken s velkým průměrem. Ty vyžadovaly velké předpětí, aby se neshrnovaly.

Data získaná měřeními byla importována do tabulkového editoru a bylo na nich provedeno statistické zpracování hodnot maximální, efektivní a zbytkové tepelné sráživosti na zvolených teplotách.

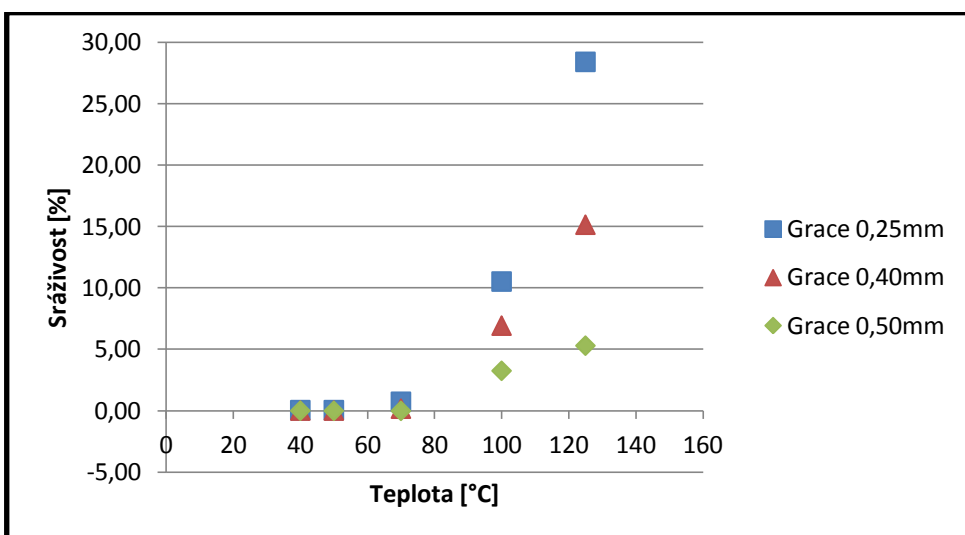
Tab. 17 Přehled efektivní, zbytkové a maximální tepelné sráživosti

Efektivní tepelná sráživost	40°C	50°C	70°C	100°C	125°C	150°C
Grace 0,25mm	-0,08	-0,11	0,43	9,86	27,84	26,12
Grace 0,40mm	-0,09	-0,16	-0,19	6,26	14,42	9,64
Grace 0,50mm	-0,12	-0,2	-0,38	2,54	4,36	-7,07
Zbytková tepelná sráživost	40°C	50°C	70°C	100°C	125°C	150°C
Grace 0,25mm	0,04	0,04	0,72	10,51	28,41	26,57
Grace 0,40mm	0	0	0,16	6,92	15,14	10,88
Grace 0,50mm	-0,01	-0,02	-0,02	3,24	5,29	-5,8
Maximální tepelná sráživost	40°C	50°C	70°C	100°C	125°C	150°C
Grace 0,25mm	0,04	0,04	0,72	10,51	28,41	37,05
Grace 0,40mm	0,02	0,02	0,16	6,92	15,14	20,48
Grace 0,50mm	0	0	0	3,24	5,29	4,97

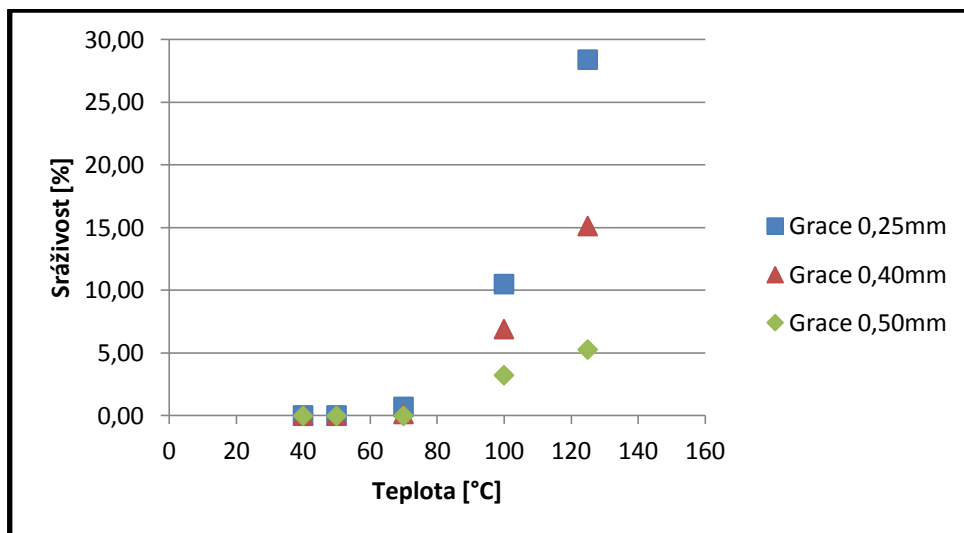
Z tabulky je vidět, že u teploty 150°C se vlákna už natavují a nedrží svojí strukturu, proto není tato teplota ani v grafech uvedena.



Obr. 60 Efektivní tepelná sráživost



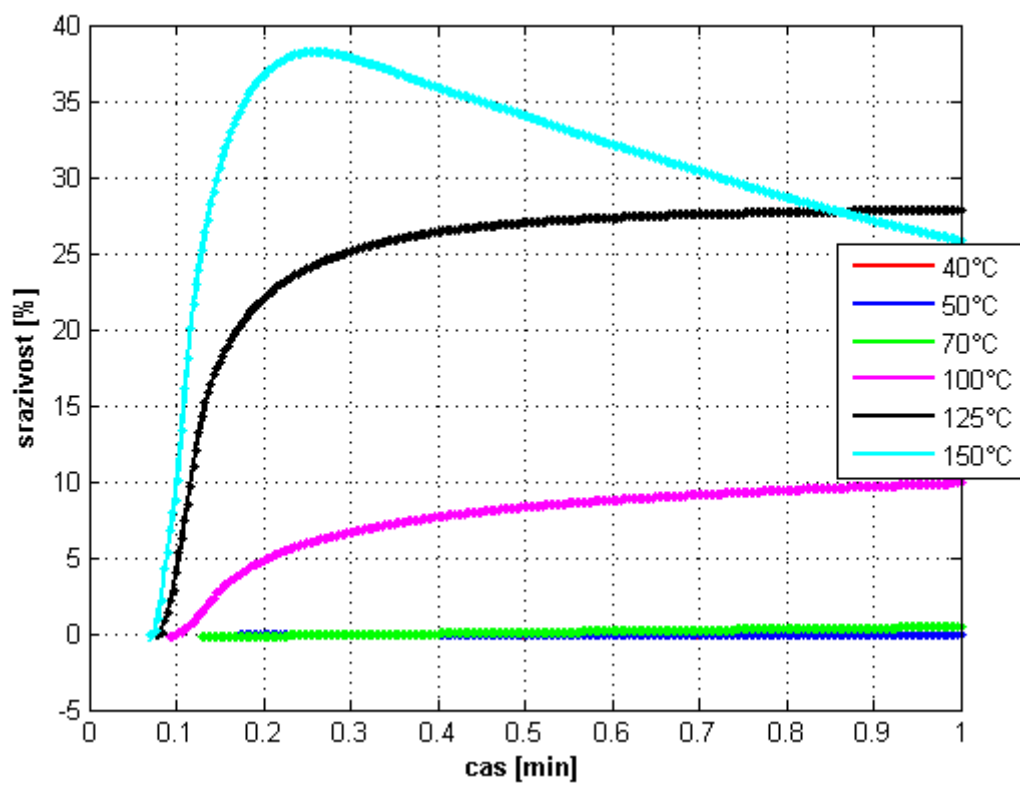
Obr. 61 Zbytková tepelná sráživost



Obr. 62 Maximální tepelná sráživost

Na obrázcích je dobře vidět, že vlákna se do určité teploty nesráží, a pak nastane poměrně velké srážení. Je zde také vidět, že průměr vlákna má vliv i na tepelnou sráživost.

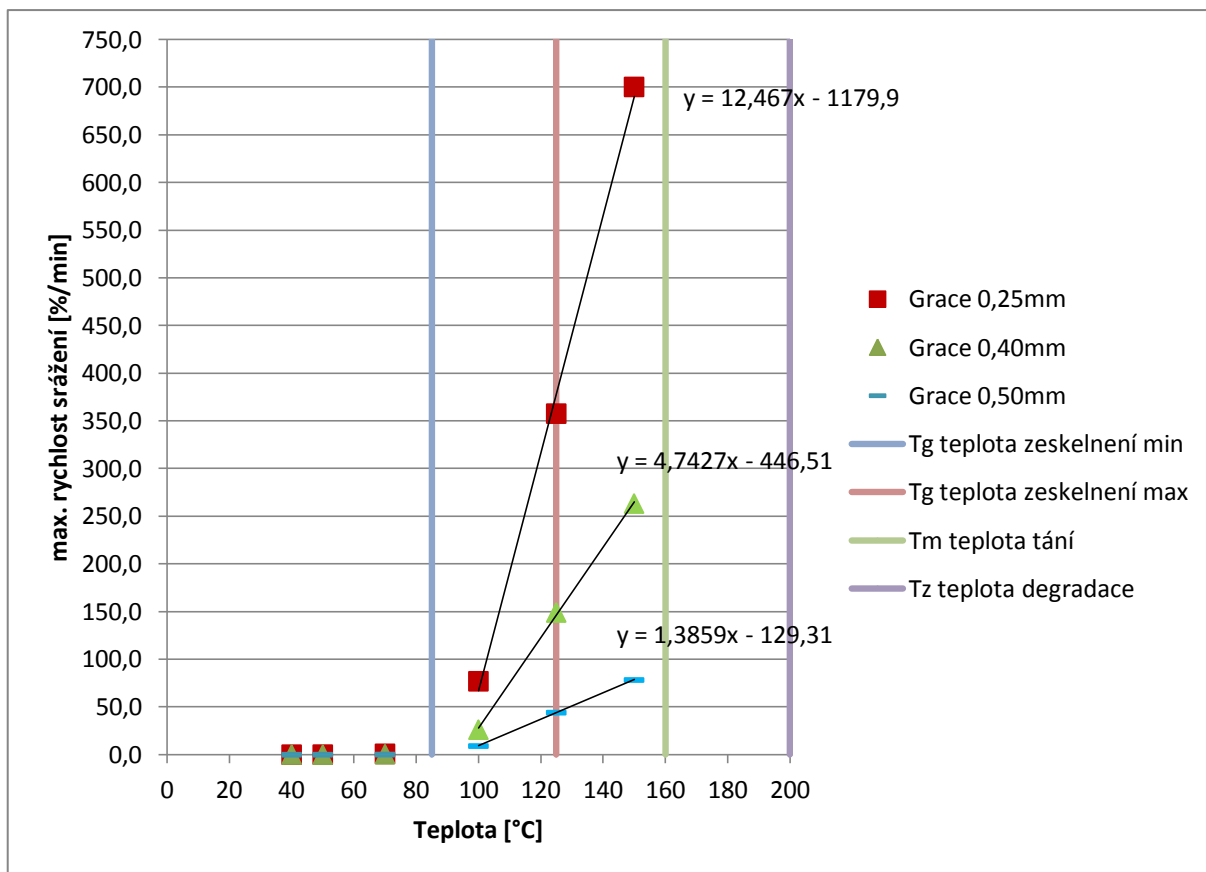
Aby byla zjištěna maximální rychlost srážení je zapotřebí, vykreslit pomocí Matlabu kinetické srážecí křivky. Před derivováním jsou kinetické křivky vyhlazeny pomocí spline. Hodnoty maximální srážecí rychlosti jsou zaneseny do grafu v závislosti na teplotě a pomocí lineární regrese je stanovena citlivost. Je zde uvedena pouze kinetická srážecí křivka pro vlákna o průměru 0,25mm ostatní jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 63 Kinetické křivky srážení

Tab. 18 Hodnoty maximální srážecí rychlosti

Max. rychlost srážení [%/min]	40°C	50°C	70°C	100°C	125°C	150°C
Grace 0,25mm	0,12	0,17	1,01	77,11	357,80	700,44
Grace 0,40mm	0,22	0,12	0,57	26,32	149,19	263,45
Grace 0,50mm	0,07	0,10	0,22	9,15	44,19	78,45



Obr. 64 Maximální rychlost srážení a citlivost jednotlivých vláken

Diskuze

Bylo potvrzeno, že výrobcem udávaná teplota použití byla správně stanovena. Proto bude doporučeno, aby při práci s optickými vlákny popřípadě s výrobky, ve kterých budou použita, byla dodržena teplota 70°C. Pokud by při zpracování byla tato hraniční teplota překročena, hrozilo by narušení struktury výrobku z důvodu srážení optických vláken čili změně délky vláken.

Pomocí lineární regrese se stanovila také citlivost vláken na teplotu. Je zřejmé, že vlákna s menším průměrem jsou více citlivá, proto je jejich rychlost srážení větší než u vláken s větším průměrem. Z toho lze usoudit, že pokud by byla hraniční teplota 70°C překročena v malé míře u vláken s větším průměrem, nemuselo by to nutně znamenat porušení struktury.

4.4 Lomy

Pro zajímavost byly pořízeny snímky lomů vláken z trhačky a dvojohybu, pomocí elektronového mikroskopu. Za pomoci fraktografie byli částečně lomy identifikováni.

Fraktografie je věda o povrchových lomech materiálu. Vytváří teoretický model růstu trhliny v tělese. Různé způsoby růstu trhliny vytvářejí na povrchu lomu charakteristické znaky, díky nimž jsou identifikovány. Důležitým cílem je také zjistit původ trhliny a její příčinu. Vznik trhliny se nejčastěji zjišťuje makroskopickou analýzou povrchu lomu, nebo analýzou světelným mikroskopem.

Lom v tělese nastane tehdy, pokud napětí působící na těleso vyvolá mezní stav namáhání. To znamená, že pokud je těleso bez vnějších či vnitřních chyb, napětí v tělese přesáhne mez jeho pevnosti. Časté jsou případy, kdy těleso obsahuje nečistotu, např. trhlínu. V takovém případě se hodnotí jeho mezní stav podle lomové mechaniky. Podle ní lom nastane tehdy, jak napětí v tělese přesáhne hodnotu

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y(\pi \cdot a_c)^{1/2}} \quad (41)$$

kde K_{IC} je lomová houževnatost materiálu tělesa, a_c je kritická velikost trhliny a Y je tvarový součinitel.

Z toho vyplývá, že při náhlém lomu má na proces vliv velikost trhliny a lomová houževnatost materiálu.

Při fraktografii je zkoumán povrch lomu vizuálně nebo pomocí rastrovacího nebo transmisního elektronového mikroskopu. Lomová plocha je tvořena systémem jednotlivých plošek, které se nazývají fazety. Určitým způsobem namáhání (statickým, dynamickým atd.) odpovídají fazety určitému mechanismu vzniku lomu.

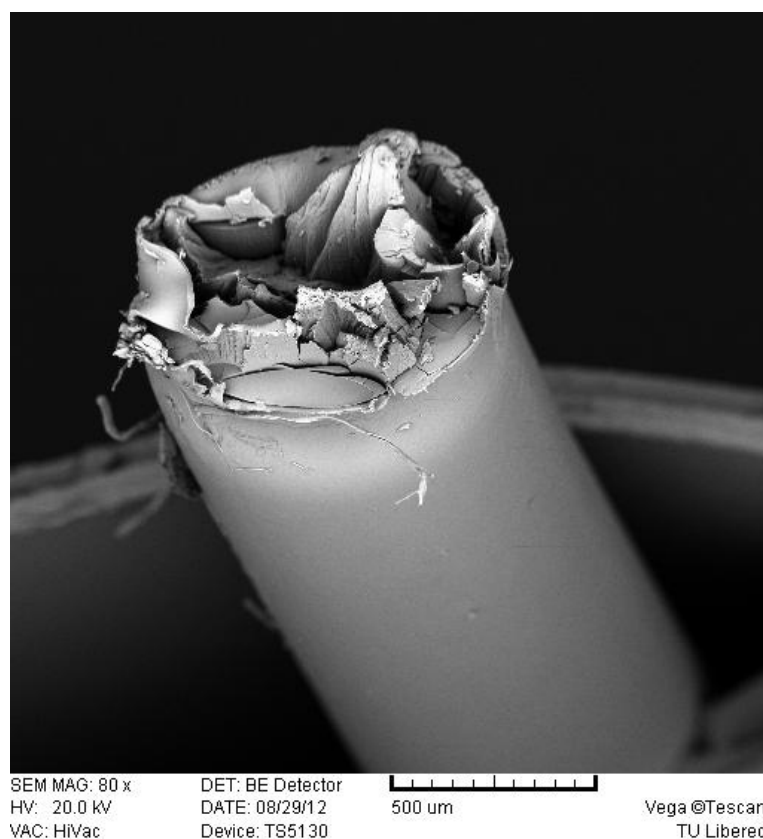
Zkoumání lomů může být prováděno makro- či mikroskopicky. V mikroskopickém měřítku jsou lomy označovány jako *houževnaté*, pokud vzniknou mechanismem tvárného oddělování, nebo *křehké*, pokud vzniknou mechanismem transkrystalického štěpení, interkrystalického oddělování, popřípadě dekohézíí hraničních oblastí. Z makroskopického hlediska se mohou lomy rozdělit podle rozsahu plastických deformací, na lomy *křehké* a *houževnaté*. Dají se i dále dělit podle rozsahu

plastické deformace, na křehké – do 1 ‰, kvázikřehké – do 1%, kvázihouževnaté – do 5% a houževnaté – nad 10%. Pokud se rozsah plastické deformace hodnotí vizuálně, je možné, že při hodnocení stejných lomů dochází k rozdíům. Všechny druhy mezikrystalového porušení se při vizuálním hodnocení zdají jako křehké.

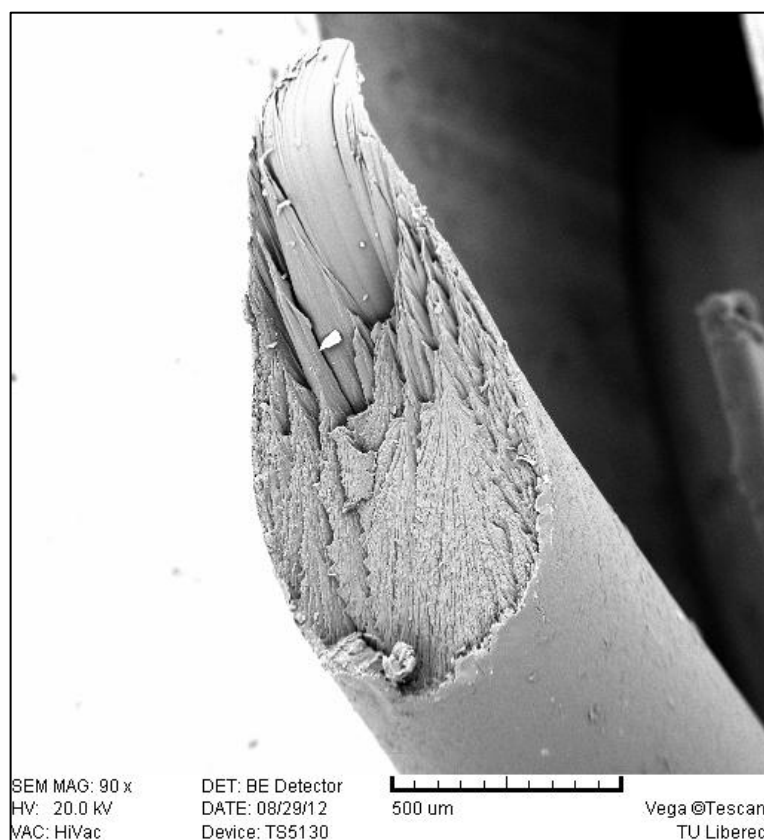
Dalším kritériem při hodnocení lomu může být velikost objemu plastické deformace. *Houževnaté* lomy se vyznačují převážně rozsáhlou plastickou deformací. Naopak *křehký* lom neprojevuje v okolí žádné makrodeformace, tedy spotřeba energie při vzniku je malá.

Rozdělení lomů může být různé, všeobecně se však dělí do čtyř kategorií: *houževnaté, křehké, únavové a creepové*.

Podle rozsahu makroskopických deformací v okolí lomové plochy členíme také lomy na vizuálně křehké a vizuálně houževnaté. Ve vizuálně křehkých se plastická deformace omezuje jen na hrot postupující trhliny a makroskopicky je lom bez viditelné plastické deformace. U vizuálně houževnatých je plastická deformace makroskopicky viditelná. Vizuálně se projevuje kontrakce (smrštění) materiálu v okolí lomové plochy, případně i prodloužení tělesa. Povrch u takových lomů je matný a jemně vláknitý. ^[15]



Obr. 65 Lom ohybu Grace 1,00mm



Obr. 66 Lom trhu Grace 1,00mm

Diskuze

Na obrázcích Obr. 65, Obr. 66 je vidět, že se jedná o houževnaté lomy. Existuje i další podrobnější rozdělení, ale tato oblast je velice složitá a obsáhlá, a na identifikaci je potřeba více mikroskopických snímků a určitá praxe. Proto není možná přesnější identifikace lomů pořízených v tomto experimentu. Zbylé lomy jsou uvedeny v příloze 3.

5 Závěr

V úvodní části této práce byla popsána optická vlákna a principy jejich vyzařování, druhy optických vláken, důležité parametry a vlivy ztráty svítivosti. V návaznosti byly poté popsány výrobní technologie, jak vláken skleněných, tak i moderních polymerních.

Ústřední částí této práce bylo navržení testování stranově vyzařujících optických vláken, používaných pro aktivní bezpečnostní textilie. S ohledem na použití těchto vláken byly stanoveny mechanické, optické a tepelné vlastnosti, které charakterizují funkci optických vláken v těchto textiliích. Ke každé vlastnosti byl navržen způsob testování na přístrojích běžných v textilních laboratořích.

Experimentální část se zabývala přímo testováním vybraných vlastností stranově vyzařujících vláken. Z vyhodnocených dat je zřejmé, že průměr vlákna negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tažnost a počáteční modul. Průměr vlákna také ovlivňuje flexibilitu a odolnost v ohybu. Z tohoto důvodu je možno vlákna s větším průměrem použít jen na povrch textilie, nebo u výrobků zabudovat vlákna do předem zhotovených dutin, a tím eliminovat ohyb vlákna. Pokud by se uvažovalo o zatčení či zapletení optických vláken, je doporučeno použít vlákna o malém průměru, která jsou více ohebná a odolná vůči ohybu a namáhání. Při testování optických vlastností se ovšem ukázalo, že průměr vlákna má pozitivní vliv na intenzitu vyzařování, protože vlákna s větší plochou průřezu přijmou více světelného signálu ze zdroje do svého jádra. Problémem u stranově vyzařujících vláken je především ztráta intenzity vyzařování se vzdáleností od zdroje. Tento jev lze nejlépe eliminovat přidáním zdrojů světla na oba konce vlákna. Testování tepelných vlastností potvrdilo teplotu použití 70°C. Po překročení této hraniční teploty dochází ke změně délky vlákna (srážení). Rychlost srážení je opět ovlivněna průměrem vlákna. Vlákna s malým průměrem se sráží rychleji a jsou citlivější na tepelné vlivy.

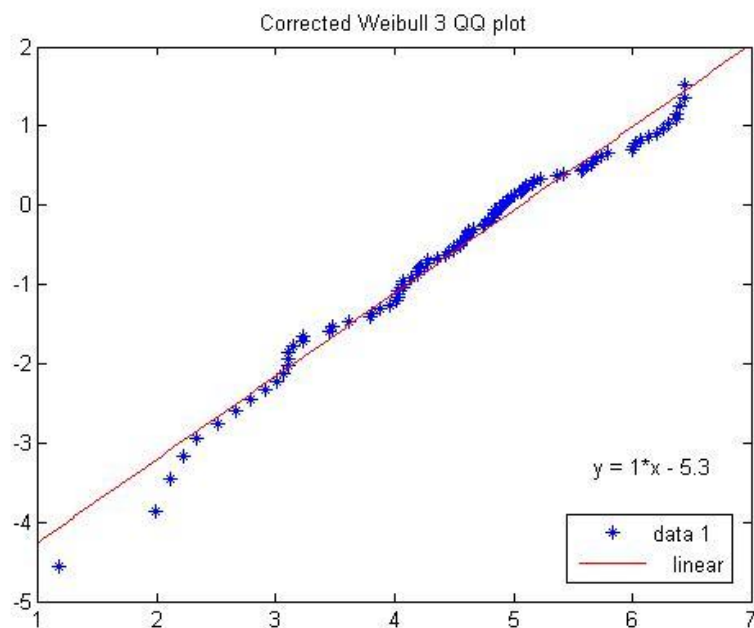
Díky zjištěním při testování vlastností lze navrhnout nejvhodnější použití stranově vyzařujících vláken ve výrobcích pro aktivní bezpečnost. Hlavním požadavkem na bezpečnost je dobrá viditelnost, proto je navrženo použít vlákna s velmi silným průměrem. Vlákna budou mít ovšem nízkou flexibilitu, proto by se měly do výrobků aplikovat pokud možno v napřímeném stavu. Toho se docílí díky dutinám na okrajích výrobku nebo umístění v opletu jako jádro na výrobek. Aby bylo docíleno

stejněměrnému vyzařování, měli by být umístěny zdroje světla na oba konce vlákna. Také je doporučeno, aby se výrobky používaly do hraniční teploty 70°C.

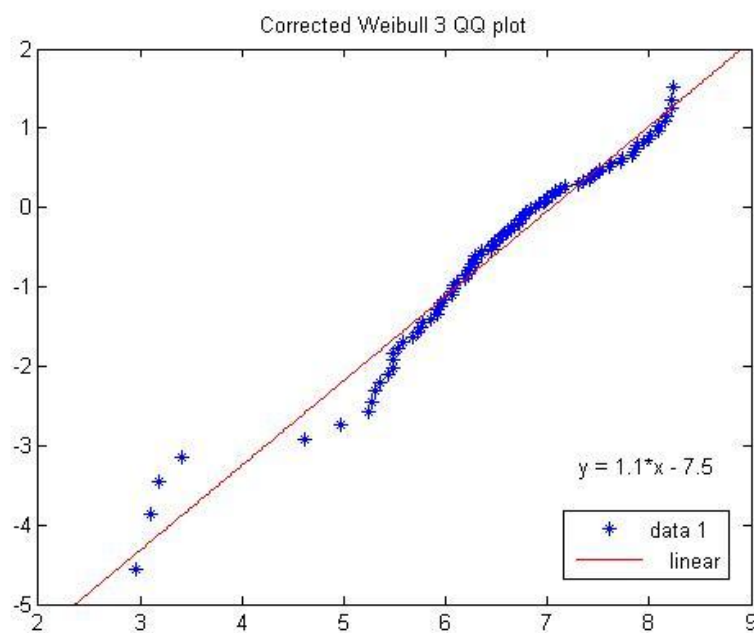
Úplně na závěr práce byly pořízeny pro zajímavost snímky lomů z namáhání tahem a ohybem. Byla provedena i základní identifikace nasnímaných lomů. Oblast lomů je velice složitá a obsáhlá, proto by se této problematice měla zabývat samostatná práce.

Příloha 1

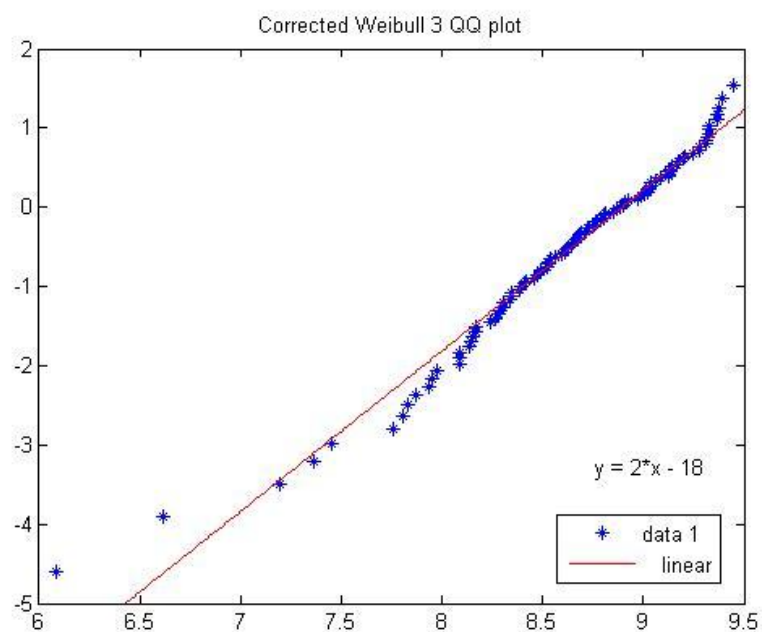
Ukázka zbylých Q-Q grafů pro správné stanovení tří-parametrového Weibulova rozdělení.



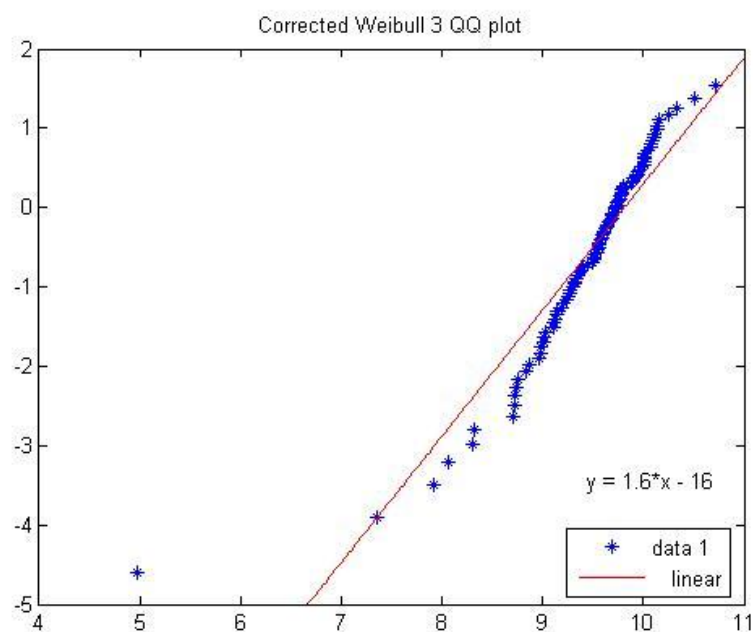
Obr. 67 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,75mm



Obr. 68 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,50mm



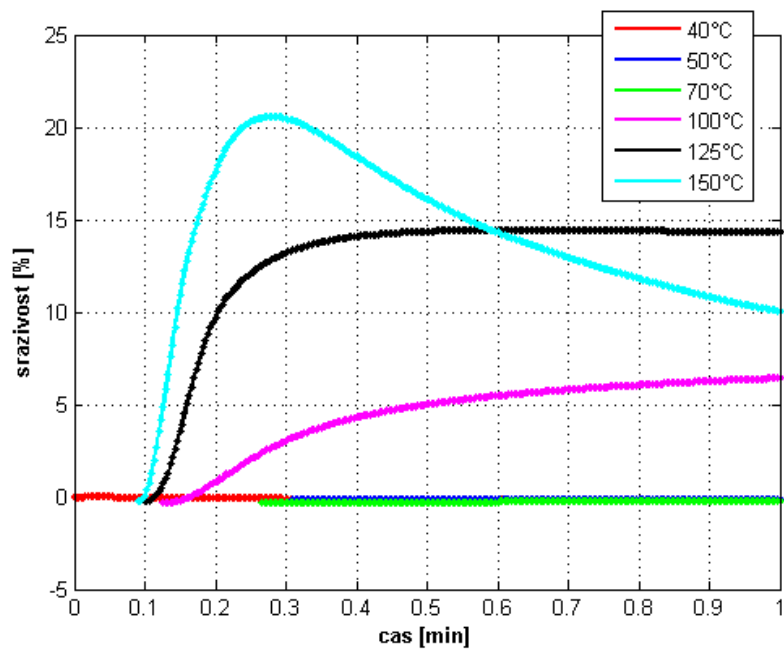
Obr. 69 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,40mm



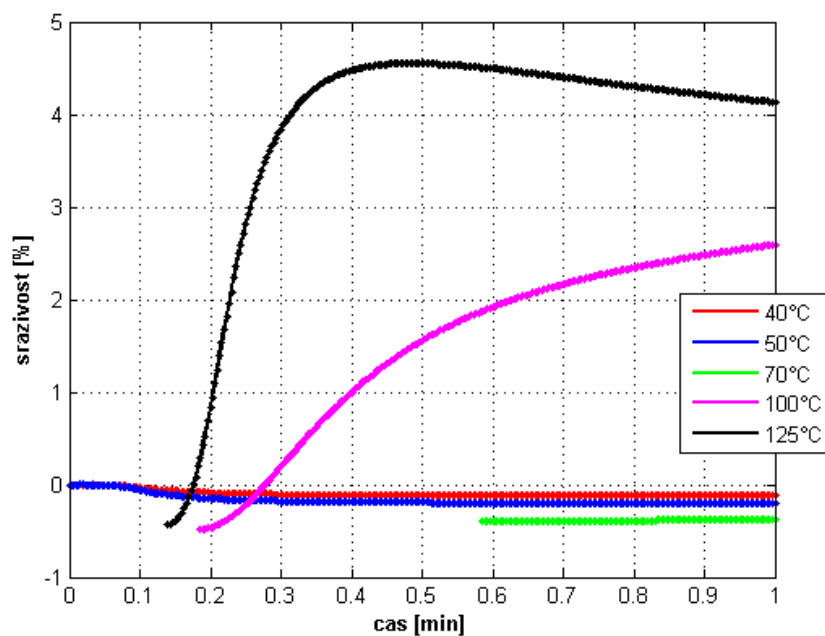
Obr. 70 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,25mm

Příloha 2

Kinetické křivky srážení pro určení maximální rychlosti srážení.



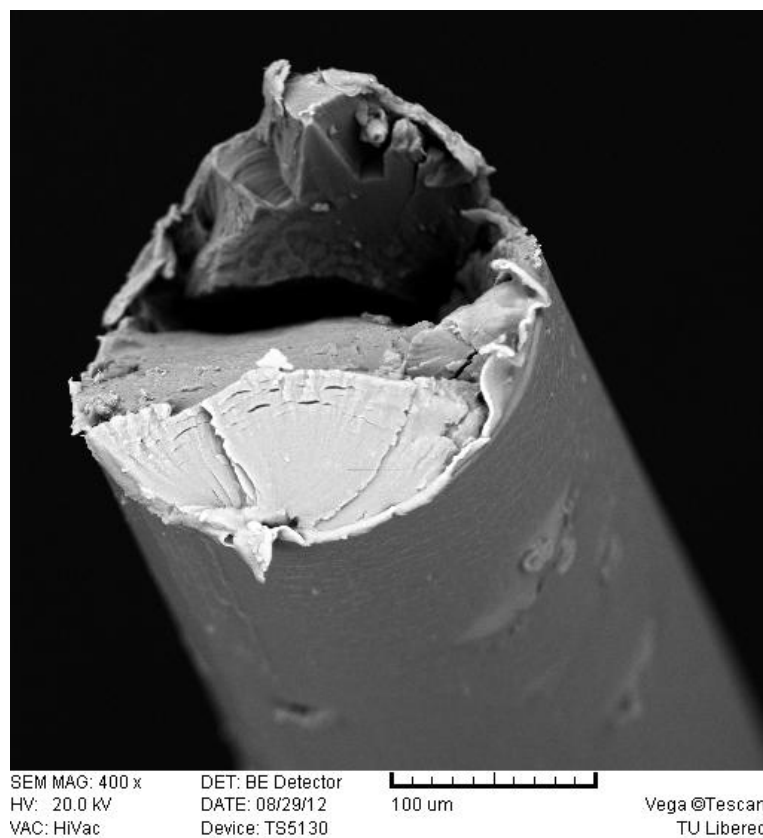
Obr. 71 Kinetická křivka srážení pro Grace 0,40mm



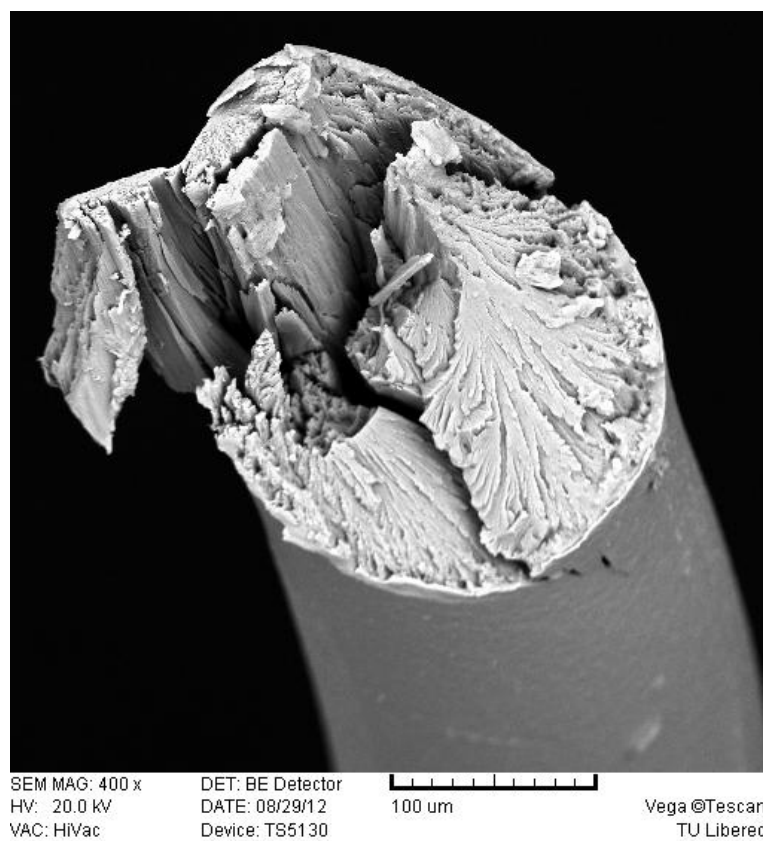
Obr. 72 Kinetická křivka srážení pro Grace 0,50mm

Příloha 3

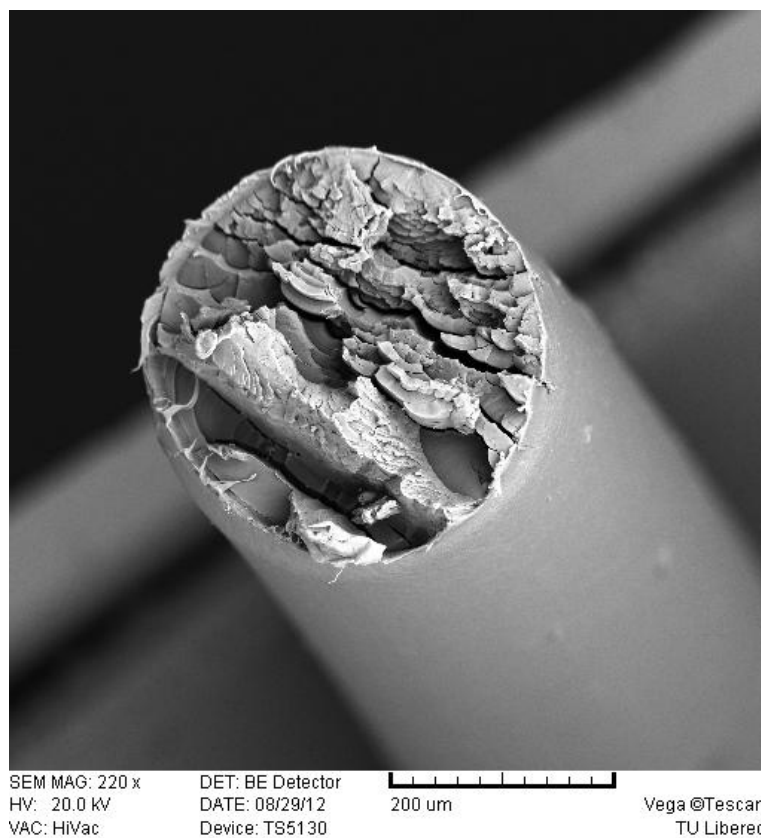
Ukázka snímků lomů vláken namáhaných ohybem a tahem.



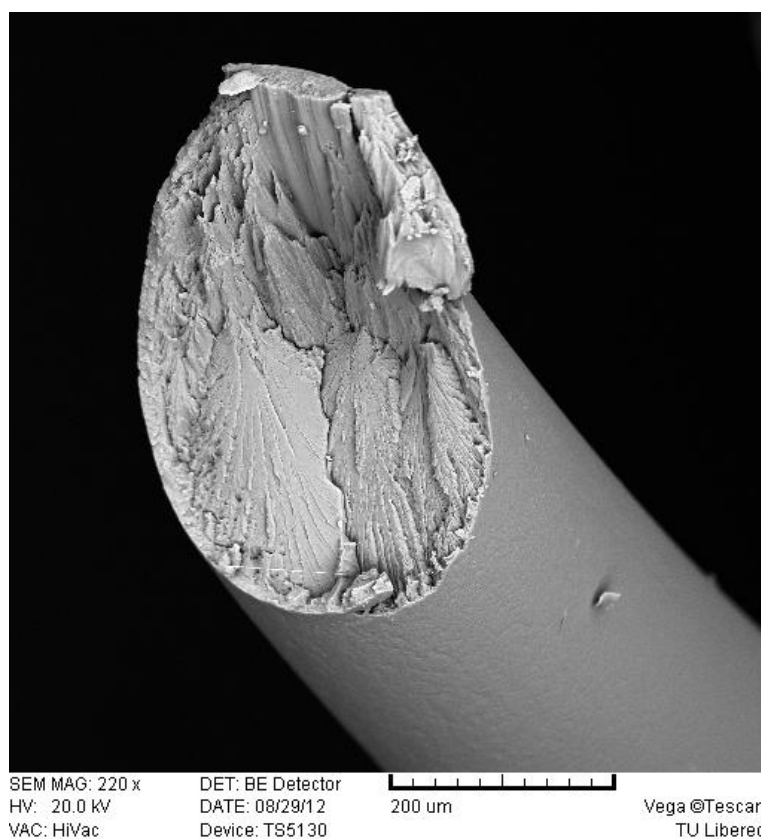
Obr. 73 Lom ohybem Grace 0,25mm



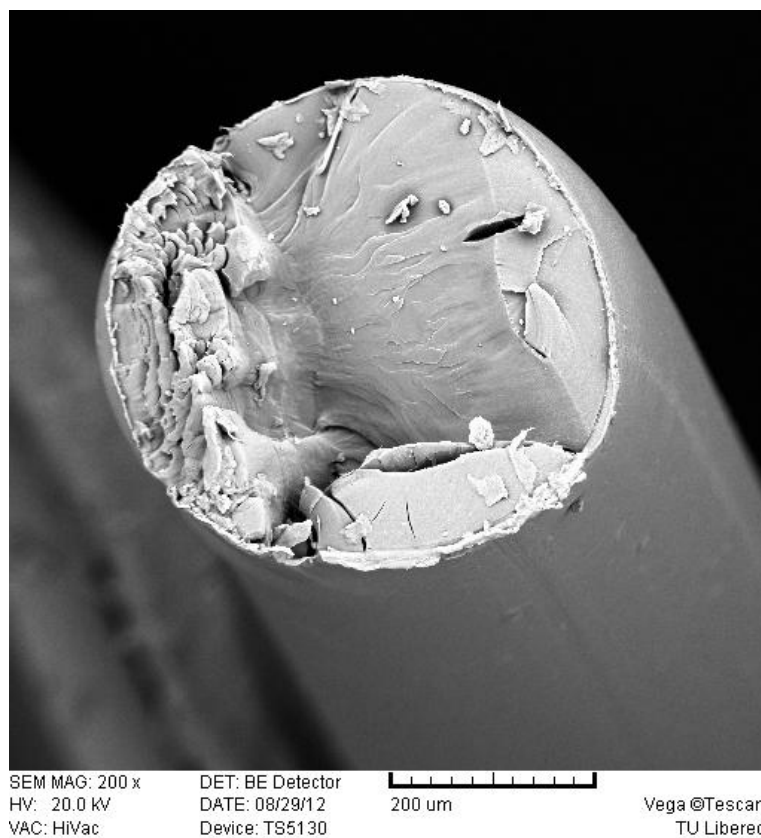
Obr. 74 Lom trhem Grace 0,25mm



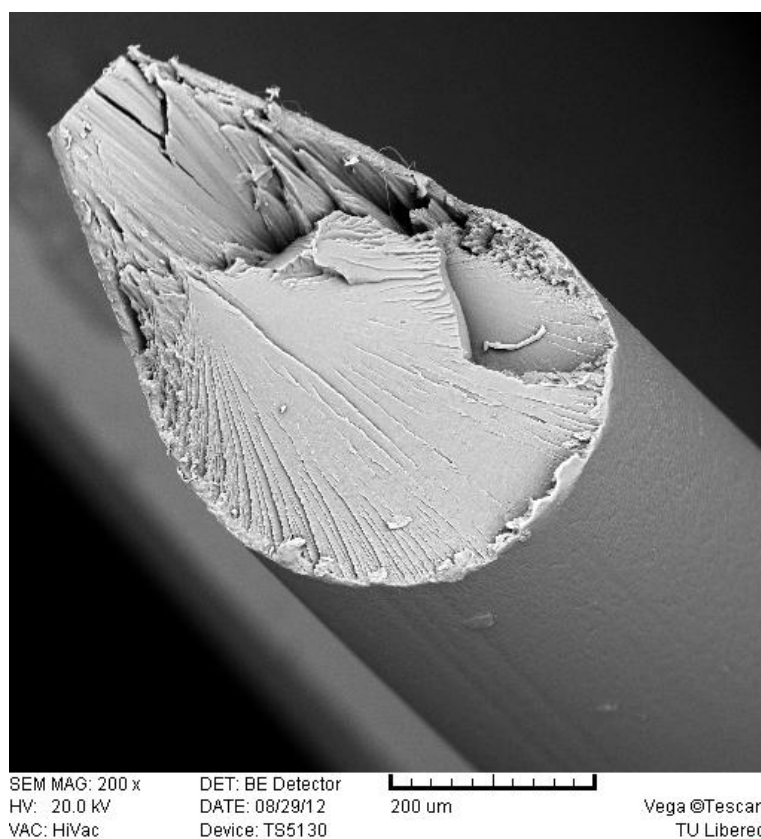
Obr. 75 Lom ohybem Grace 0,40mm



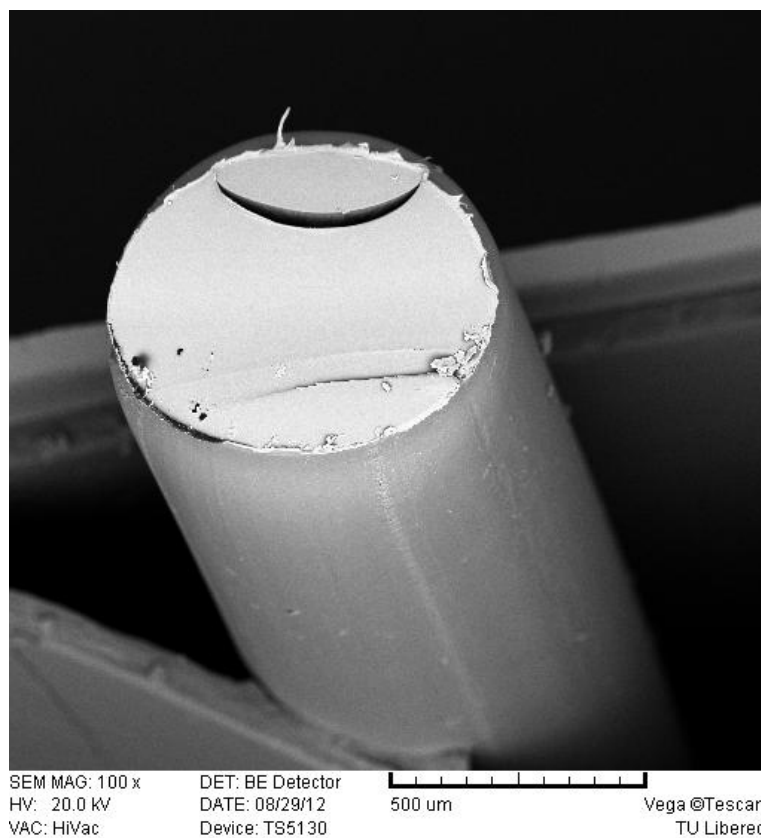
Obr. 76 Lom trhem Grace 0,40mm



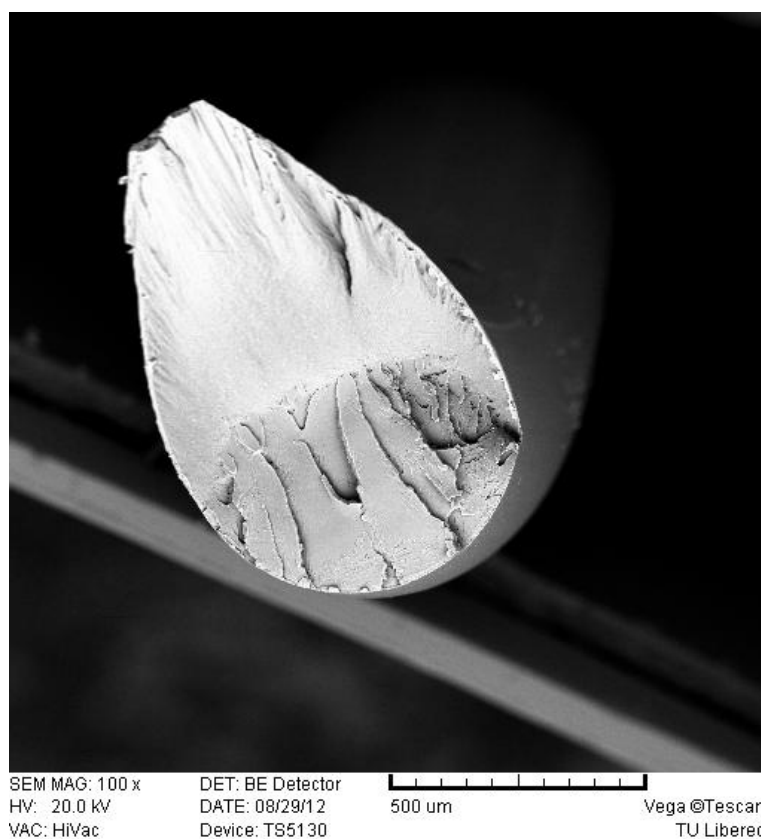
Obr. 77 Lom ohybem Grace 0,50mm



Obr. 78 Lom trhem Grace 0,50mm



Obr. 79 Lom ohybem Grace 0,75mm



Obr. 80 Lom trhem Grace 0,75mm

6 Použitá literatura

[1] *Optika* [online]. 11.9.2003 [cit. 2011-11-22]. Optika . Dostupné z WWW: <<http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/optika.pdf> >.

[2] VLČEK, Čestmír. *Vláknová optika : fakulta letectva a protivzdušné obrany*. Brno : Vojenská akademie v Brno, 2000. 164 s.

[3] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna : verze 2.1.3*. Ostrava, 2006. 167 s. Dokument. VŠB - Technická univerzita Ostrava.

[4] MERYOVÁ, Barbora. *Textilní struktury z optických vláken*. Liberec, 2010. 66 s. Bakalářská práce. TUL.

[5] BUBELA, Ondřej. *Plastová optická vlákna a jejich aplikace v praxi*. Brno, 2010. 89s. Bakalářská práce. VUT v Brně.

[6] HARLIN, Ali. MYLLYMÄKI, Hanna. GRAHN, Kirsi. *Polymeric optical fibres and future prospects in textile integration*. AUTEX Research Journal, Vol.2, No3, 2002. 143s. Článek. Tampere University Of Technology in Finland.

[7] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online].[cit. 2012-11-22]. Plasty. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm >.

[8] HAVLÍČEK, František. *Výroba netkaných textilií*. Prostějov, 2009. 81s. Přednáška. TUL

[9] VANÍČEK, Jiří. MILITKÝ, Jiří. *Metody termické analýzy a Vlastnosti vláken*. Liberec, 2011. Přednášky. TUL

[10] *Přístroje* [online].[cit. 2012-11-22]. Přístroje. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/index.cgi?fun=pristroje> >.

[11] *Interní norma č.22-201-01/01 Ohybová tuhost příze* [online]. 7.12.2004 [cit. 2012-11-22]. Interní norma č.22-201-01/01 Ohybová tuhost příze. Dostupné z WWW: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/5Normy/IN%2022-201-01_01.pdf>.

[12] MERYOVÁ, Barbora. *Měření intenzity vyzařování optických vláken*. Liberec, 2012. 77 s. Diplomová práce. TUL.

[13] MILITKÝ, Jiří. *Textilní zkušebnictví část IV*. Liberec, 2011. Přednášky. TUL

[14] MILITKÝ, Jiří. KŘEMENÁKOVÁ, Dana. *Flex Fatigue of Polymeric Optical Fibers*. Liberec, 2012. 6 s. Článek. TUL.

[15] HRIVŇÁK, Ivan. *Fraktografie*. Bratislava, 2009. 94 s. Skripta. STU v Trnavě.

[16] *LumiGram* [online].[cit. 2012-11-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.lumigram.com/catalog/page11.php>>.

[17] *Textilní zkušebnictví* [online].[cit. 2012-11-22]. ZKT Tul Dostupné z WWW: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/ZKT1dil.pdf>>.

[18] *Průsvitný beton LiTraCon* [online].[cit. 2012-11-22]. Dostupné z WWW: <<http://stavba.hyperbydleni.cz/stavebni-technologie/1979-prusvitny-beton/>>.

[19] Nováková, Monika. *Uplatnění stranově svítících optických vláken v aktivních bezpečnostních textiliích*. Liberec, 2010. 33 s. Bakalářská práce. TUL.

7 Seznam obrázků

Obr. 1 Model optického vlákna[2]	13
Obr. 2 Šíření světla[1]	15
Obr. 3 Možné dráhy odrazu[1]	15
Obr. 4 Značení úhlů[1]	15
Obr. 5 Zrcadlový odraz (hladký povrch) a difúzní odraz (drsňý povrch) [1].....	16
Obr. 6 Lomený a odražený paprsek[4]	17
Obr. 7 Šíření světla na rozhraní voda, vzduch[1]	17
Obr. 8 Změna směru paprsku[1]	18
Obr. 9 Totální odraz[1]	18
Obr. 10 Princip tavení skloviny[3]	21
Obr. 11 Výroba preformy technologií OVPO[3].....	22
Obr. 12 Výroba preformy technologií VAD[3].....	23
Obr. 13 MCVD technologie[3].....	24
Obr. 14 Výroba preformy pomocí PCVD technologie[3]	24
Obr. 15 Princip indukčního ohřevu[3].....	27
Obr. 16 Princip tažení vlákna[3].....	27
Obr. 17 Metoda dvojitého kelímku[3].....	28
Obr. 18 Optické vlákno SI[2]	30
Obr. 19 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou[4].....	31
Obr. 20 Mnohovidová vlákna s gradientní změnou[4].....	31
Obr. 21 Gradientní optické vlákno[2].....	32
Obr. 22 Jednovidové optické vlákno[4]	32
Obr. 23 Jednovidové optické vlákno[2]	33
Obr. 24 Numerická apertura[4]	34
Obr. 25 Šíření paprsku v ohybu vlákna[4]	36
Obr. 26 a) vid v napřímeném vlákne, b) vid při ohybu vlákna[12].....	36
Obr. 27 Mikroohyb způsobený při výrobě[12].....	37
Obr. 28 Mikroohyb vlákna[12].....	37
Obr. 29 Nadmolekulární struktura amorfňích plastů.....	40
Obr. 30 Nadmolekulární struktura krystalických plastů.....	41
Obr. 31 Lineární uspořádní.....	42
Obr. 32 Rozvětvené uspořádní.....	42

Obr. 33 Zesíťované uspořádání	43
Obr. 34 LiTraCon průsvitný beton[18].....	45
Obr. 35 a) tkanina před odřením b) tkanina po odřením[12].....	46
Obr. 36 Různé poškození vláken[12]	47
Obr. 37 Poškození optického vlákna[12]	47
Obr. 38 Ukázka výrobků firmy Lumigram[16]	48
Obr. 39 Prototyp reflexní kabelky od firmy Stap[12]	49
Obr. 40 NIS Elemets[10]	51
Obr. 41 Diferenční skenovací kalorimetrie[10].....	52
Obr. 42 Zařízení pro měření světelné intenzity[12]	53
Obr. 43 Tahová křivka a určení počátečního modulu	54
Obr. 44 Tahová (pracovní) křivka[17]	56
Obr. 45 Instron[10]	57
Obr. 46 Dynamic modulus tester[10]	58
Obr. 47 Přístroj na dvojohyb[14].....	62
Obr. 48 Přípravek pro stanovení ohybové tuhosti příze[11]	63
Obr. 49 Znázornění průhybové čáry příze[11]	63
Obr. 50 Zobrazení snímku snímaného pomocí software LUCIA[11]	64
Obr. 51 Přístroj Shrinkage TST2	66
Obr. 52 Vliv průměru na pevnost vlákna	69
Obr. 53 Vliv průměru na tažnost vlákna.....	70
Obr. 54 Vliv průměru na počáteční modul	71
Obr. 55 Vliv průměru na Flexibilitu vlákna	72
Obr. 56 Vliv průměru na počet ohybů	73
Obr. 57 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 1,00mm	73
Obr. 58 Vliv průměru na nejnižší počet ohybů	74
Obr. 59 Závislost Flexibility na počtu ohybů	75
Obr. 60 Efektivní tepelná sráživost	79
Obr. 61 Zbytková tepelná sráživost.....	79
Obr. 62 Maximální tepelná sráživost.....	80
Obr. 63 Kinetické křivky srážení.....	81
Obr. 64 Maximální rychlost srážení a citlivost jednotlivých vláken	82
Obr. 65 Lom ohybu Grace 1,00mm.....	84
Obr. 66 Lom trhu Grace 1,00mm	85

Obr. 67 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,75mm	88
Obr. 68 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,50mm	88
Obr. 69 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,40mm	89
Obr. 70 Kvantil-kvantilový graf pro Grace 0,25mm	89
Obr. 71 Kinetická křivka srážení pro Grace 0,40mm	90
Obr. 72 Kinetická křivka srážení pro Grace 0,50mm	90
Obr. 73 Lom ohybem Grace 0,25mm	91
Obr. 74 Lom trhem Grace 0,25mm	91
Obr. 75 Lom ohybem Grace 0,40mm	92
Obr. 76 Lom trhem Grace 0,40mm	92
Obr. 77 Lom ohybem Grace 0,50mm	93
Obr. 78 Lom trhem Grace 0,50mm	93
Obr. 79 Lom ohybem Grace 0,75mm	94
Obr. 80 Lom trhem Grace 0,75mm	94

8 Seznam Tabulek

Tab. 1 Ukázka indexů lomu v různých látkách ^[1]	16
Tab. 2 Teplotní vlastnosti PMMA	43
Tab. 3 Tepelné vlastnosti PC	44
Tab. 4 Přehled zkoumaných vzorků	68
Tab. 5 Vlastnosti výrobce	68
Tab. 6 Parametry pro Instron	68
Tab. 7 Vyhodnocená data pro pevnost	69
Tab. 8 Vyhodnocená data pro tažnost	70
Tab. 9 Vyhodnocená data pro počáteční modul	70
Tab. 10 Vyhodnocená data pro flexibilitu	71
Tab. 11 Parametry pro Dvojohyb	72
Tab. 12 Charakteristiky pro ohybovou únavu	73
Tab. 13 Parametry Weibullova rozdělení	74
Tab. 14 Parametry pro přístroj na dvojohyb	75
Tab. 15 Parametry intenzity vyzařování	77
Tab. 16 Parametry pro TST2	78
Tab. 17 Přehled efektivní, zbytkové a maximální tepelné sráživosti	78
Tab. 18 Hodnoty maximální srážecí rychlosti	81